

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
11 août 2005 (11.08.2005)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2005/074001 A2

(51) Classification internationale des brevets⁷ :
H01J 37/06, 37/09, 37/28

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2004/003407

(22) Date de dépôt international :
29 décembre 2004 (29.12.2004)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
03 51228 30 décembre 2003 (30.12.2003) FR
03 51229 30 décembre 2003 (30.12.2003) FR

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) : **COM-
MISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE** [FR/FR];
31-33 rue de la fédération, F-75752 Paris 15ème (FR).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : **DE-
SIERES, Yohan** [FR/FR]; 46, rue Pierre Semard, F-38000
Grenoble (FR). **NICOLAS, Pierre** [FR/FR]; 20, rue de
l'Ancienne Ferme, F-38120 Saint-Egreve (FR). **GILLOT,
Charlotte** [FR/FR]; 11bis, rue Victor Hugo, F-38500
Voiron (FR). **GIDON, Serge** [FR/FR]; 8 Le Petit Bois,
F-38140 La Murette (FR). **MARTIN, Jean-Luc** [FR/FR];
Le Roulet, F-38620 Saint Geoires en Valdaine (FR).

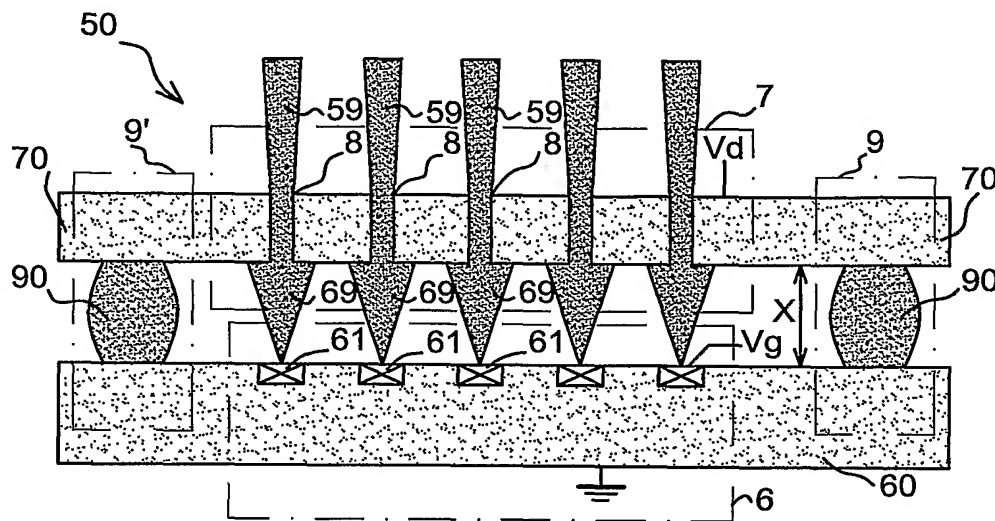
(74) Mandataire : **BRYCKMAN, Georges**; Brevatome, 3, rue
du docteur Lancereaux, F-75008 Paris (FR).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de
protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AT,
AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO,
CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB,
GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: DIVERGENCE-CONTROLLED HYBRID MULTIPLE ELECTRON BEAM -EMITTING DEVICE

(54) Titre : DISPOSITIF D'EMISSION ELECTRONIQUE MULTIFAISCEAUX HYBRIDE A DIVERGENCE CONTROLEE



(57) Abstract: The invention concerns an electron-emitting device (50) with multiple electron beams (59) comprising a first struc-
ture (6) including a plurality of sources (61) of electron beams (69), hybridized with a second structure (7) comprising a plurality of
lens apertures 8).

(57) Abrégé : L'invention concerne un dispositif d'émission électronique (50) à plusieurs faisceaux d'électrons (59) comprenant
une première structure (6) comportant une pluralité de sources (61) d'émission de faisceau d'électrons (69), hybridée (9) avec une
deuxième structure (7) comportant une pluralité d'ouvertures (8) de diaphragme.

WO 2005/074001 A2



KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasién (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI

Publiée :

— sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport

En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.

**DISPOSITIF D'EMISSION ELECTRONIQUE MULTIFAISCEAUX
HYBRIDE A DIVERGENCE CONTROLEE**

DESCRIPTION

5 DOMAINE ET ETAT DE LA TECHNIQUE

La présente invention concerne les dispositifs d'émission électronique émettant des faisceaux d'électrons, et plus particulièrement un dispositif d'émission multifaisceaux comportant
10 plusieurs sources d'émission d'électrons capables d'émettre plusieurs faisceaux d'électrons en parallèle, avec un système pour focaliser ces faisceaux d'électrons.

Dans le secteur industriel, les dispositifs
15 d'émission électronique sont utilisés comme moyens d'observation et d'analyse microscopique, plus connue sous l'appellation de microscopie à balayage électronique (SEM), comme moyens d'insolation et de gravure (lithographie), notamment dans la lithographie
20 de circuits intégrés, ou comme moyens de test et de mesure, ou encore comme moyens d'écriture ou de stockage.

Dans les applications industrielles, on fait encore appel à des dispositifs d'émission
25 électronique monosources, émettant un seul faisceau d'électrons. Les applications industrielles sont considérablement limitées par l'utilisation de dispositifs monosources qui offrent seulement une faible surface de champ accessible et une faible
30 vitesse de gravure/écriture de circuits intégrés

inhérentes à la lenteur du balayage du faisceau électronique.

Pour se libérer de ces contraintes, le développement se porte vers une «parallélisation» de plusieurs sources, balayant chacune une surface moins importante.

Dans le domaine des dispositifs d'émission électroniques multifaisceaux, on connaît deux types de structures distinctes, la structure assemblée et la structure monolithique.

Le document intitulé « Arrayed miniature electron beam columns for high throughput sub-100 nm lithography » écrit par T.H.P.Chang et D.P.Kern, publié au « Journal of Vacuum Science Technology (American Vacuum Society) », volume B10(6), pages 2743 à 2748, paru en novembre/décembre 1992, décrit un dispositif d'émission électronique multifaisceaux 1 composé de colonnes miniatures individuelles 10 à structure assemblée en matrice, tel qu'illustré figure 1A.

Comme détaillé figure 1B, chaque colonne 10 se compose d'une pointe 12 à émission de champ d'électrons, associé à une grille d'extraction 13, un diaphragme 14 et une série de microlentilles de Einzel 15, 16, 17 pour focaliser le faisceau d'électrons, et à un groupe de plusieurs déflecteurs latéraux 18 pour dévier le faisceau de façon à obtenir un point de focalisation d'électrons qui balaye une petite surface sur une pastille de substrat 1000 correspondant à la puce de circuit intégré 100 à graver.

Chaque colonne comprend un assemblage de microlentilles électrostatiques en silicium, réalisé

indépendamment par technologie MEMS (Microsystème ElectroMécanique, en anglais « Micro Electro Mechanical System »). Chaque colonne comporte en outre un double système de rétroaction, d'une part entre la pointe 12 à
5 émission de champ et le microscope 11 à balayage à effet tunnel, et d'autre part entre l'échantillon 1000 et le microscope STM pour contrôler et rectifier la position de la pointe émettrice 12 et la focalisation du faisceau. Un certain nombre de ces colonnes 10,
10 individuelles indépendantes, sont regroupées et assemblées en damier ou en mosaïque 1 pour graver en parallèle une série de puces de circuits intégrés.

L'inconvénient d'une telle structure est que aucun élément n'est intégré, ni axialement au sein
15 d'une colonne 10, ni à un niveau transversal entre les colonnes voisines 1. La densité d'émetteurs reste donc faible et le temps d'écriture conséquent.

Les structures matricielles monolithiques permettent d'intégrer un plus grand nombre de sources
20 d'émission de faisceaux d'électrons dans un seul dispositif de taille donnée et donc d'envisager des vitesses d'écriture largement supérieures. Typiquement des pas de quelques dizaines de microns peuvent être obtenus.

25 Le document WO 89/11157 décrit un dispositif d'émission électronique multifaisceaux à structure matricielle intégrée sur un substrat. Comme illustré sur la figure 2, chaque source émettrice 21 d'un faisceau d'électron 29 comporte seulement une
30 pointe 22 émettrice d'électrons (cathode) et une grille annulaire 23 d'extraction des électrons, les sources 21

étant associées à un système de focalisation primitif formé par une plaque métallique 24 à l'arrière du substrat résistif 20 qui génère des lignes de champ 25,25' se projetant à l'avant du substrat, sauf au
5 devant des sources elles-mêmes.

Ce système de focalisation primaire à l'inconvénient d'être disposé à proximité et surtout en position postérieure par rapport aux sources d'émission du faisceau d'électrons. Il ne comporte pas réellement
10 d'optique de focalisation adéquate disposée sur le trajet du faisceau (ni électrode, ni lentille de focalisation). Il ne permet donc pas d'atteindre des résolutions inférieures à 50 nm.

Le document US-5 430 347 décrit un
15 dispositif d'émission individuelle d'un faisceau d'électrons destiné à l'affichage d'images et réalisé par dépôt de couches et dépôt de métallisation sur un substrat illustré figure 3. La source comporte une pointe émettrice, une grille annulaire et une ou deux
20 grilles de focalisation, un écran cathodique luminescent étant disposé à l'opposé, à l'avant de la source.

Le document US-5 430 347 annonce une résolution d'un point image dans le plan de focal d'un
25 diamètre de dix micromètres à une distance de un millimètre de focalisation (spot de 10 μm à 1 mm).

Une telle résolution est tout à fait insuffisante pour des applications telles que la microscopie électronique ou la réalisation de circuits
30 intégrés, domaine dans lequel on cherche à obtenir une résolution nettement inférieure au micromètre, de

l'ordre de quelques dizaines de nanomètres, ce qui est l'ordre de grandeur des motifs à réaliser.

Le document intitulé « Digital Electrostatic Electron-Beam Array Lithography » de L.R. Baylor & al. publié au « Journal of Vacuum Science Technology », volume B20 (6), paru en novembre/décembre 2002, décrit une structure matricielle d'émission d'électrons multifaisceaux intégrée sur un substrat de silicium et illustré sur les figures 3A et 3B.

Chaque site 31 d'émission de faisceau de la matrice 30 comporte une source ponctuelle 32 formée par une pointe émettrice en carbone nanométrique, dans l'axe de laquelle se superpose une série d'électrodes annulaires 33,34,35,36. La première électrode 33 est une grille d'extraction ayant pour fonction d'extraire les électrons de la pointe émettrice 32 qui forme la cathode. Les électrodes 34,35,36 successives suivantes, soumises à des potentiels VE, VC, VA, ont pour fonction de focaliser le faisceau 39 d'électrons émis sur une anode 38 faisant face au dispositif. La résolution annoncée pour ce dispositif est de 50 nm de diamètre à une distance W de focalisation de 100 µm seulement.

L'inconvénient de toutes ces structures monolithiques est de nécessiter une maîtrise d'alignement extrêmement poussée de gravure des couches. En particulier, les différents niveaux de métallisation successifs d'électrodes 33,34,35,36 doivent être gravés avec des ouvertures et un alignement très précis, l'un au dessus de l'autre, et ce sur une profondeur de 4 µm, ce qui est

particulièrement délicat en technologie microélectronique auto-alignée.

Autre problème, le dépôt de chaque émetteur 32 au fond de la cavité 31' formée par l'empilement des électrodes annulaires ne peut être obtenu que par un dépôt postérieur à la réalisation complète de la cavité. L'émetteur doit être précisément aligné et orienté selon l'axe des ouvertures des électrodes et également limité en hauteur. De plus, ce dépôt doit être contrôlé de manière homogène pour l'ensemble des émetteurs de la matrice pour obtenir des comportements optiques homogènes lors de la focalisation de chaque source, ce qui génère des contraintes importantes sur le dépôt.

Par ailleurs, les émetteurs à effets de champs présentent de façon inhérente des homogénéités d'émission entre émetteurs (la divergence des faisceaux varie d'une source à l'autre). De même, l'émission de chaque source à effets de champ présente des instabilités dans le temps, qui sont généralement impossibles à prévoir et à contrôler. Ces inhomogénéités et ses instabilités se traduiront, dans le cas du dispositif présenté par Baylor, par une variation de la résolution d'un émetteur au cours du temps, ainsi que par une inhomogénéité de résolution entre les différents émetteurs, ce qui est incompatible avec des applications haute résolution. En effet, pour ce type d'application, il est nécessaire d'avoir une taille de spot stable dans le temps et homogène entre chaque source.

L'objet de l'invention est donc de réaliser un dispositif d'émission électronique multifaisceaux programmable, compact sans les inconvénients précités et avec une résolution optique stable dans le temps et
5 homogène entre les émetteurs.

En particulier un objectif de l'invention est de fournir un ensemble de sources de faisceaux d'électrons dont la divergence est faible et stable dans le temps.

10 Un autre objectif de l'invention est de pouvoir utiliser ce dispositif pour former un ensemble de spots électroniques de dimension nanométriques.

EXPOSÉ DE L'INVENTION

Pour résoudre ces problèmes, l'invention
15 prévoit d'hybrider une structure de diaphragme, ou des moyens formant diaphragme, une structure comportant une pluralité de sources d'émission de faisceaux d'électrons ou des moyens formant source d'émission d'électrons. Ceci apporte d'une part une amélioration
20 au problème de la limitation de résolution lié à la divergence excessive de chaque source émettrice, et, d'autre part, une solution aux problèmes de l'instabilité et de l'inhomogénéité des sources émettrices ou des ouvertures angulaires dans le temps
25 et d'une source à l'autre.

Le dispositif d'hybridation aligne et sépare, à distance donnée, la structure de diaphragme par rapport à la structure de sources d'émission d'électrons.

D'autre part, l'invention prévoit que la structure de diaphragme agit simultanément comme système de focalisation électrostatique. C'est-à-dire que chaque ouverture de diaphragme est polarisée et formée de façon à former une lentille électrostatique.

En outre, l'invention prévoit d'utiliser cette source d'émission hybridée dans un système de focalisation magnétique appelé ici optique de projection magnétique ou électrostatique ou électromagnétique.

L'invention prévoit ainsi d'hybrider une électrode de diaphragme structurée sur une structure de base matricielle d'émetteurs implantée dans un substrat. L'électrode structurée joue notamment le rôle de diaphragme pour chaque faisceau d'électrons émis par chaque source à effet de champ correspondante.

Selon une forme de réalisation, la structure matricielle d'émetteur peut être une structure simple de base, ne comportant pas elle-même de système de focalisation, c'est à dire sans niveau intégré de focalisation dans le substrat. L'invention s'applique en particulier à des structures matricielle d'émetteurs dans laquelle les sources d'émission sont disposées selon un réseau à pas micrométriques, c'est-à-dire avec un écartement entre sources de l'ordre d'un micromètre à un millimètre.

De façon avantageuse selon l'invention, la réalisation de la structure matricielle d'émetteur est largement simplifiée.

L'invention est réalisée avec un dispositif d'émission électronique à plusieurs faisceaux

d'électrons comprenant une première structure, ou des premiers moyens, comportant une pluralité de source d'émission de faisceaux d'électrons hybridés avec une deuxième structure, ou des deuxièmes moyens, comportant une pluralité d'ouverture de diaphragme.

Selon l'invention la deuxième structure est formée par une électrode ou une membrane, métallique ou conductrice.

Selon l'invention, l'hybridation entre la première structure d'émission de faisceaux d'électrons et la deuxième structure d'électrode de diaphragme est réalisée par l'entremise de billes métalliques notamment de billes composées d'alliage de métaux fusibles ou de billes composées d'or.

Alternativement, l'hybridation entre la première et la deuxième structure peut être réalisée par l'entremise d'un ou de plusieurs films à conduction anisotrope.

De préférence, la première structure comporte un agencement périodique des sources d'émission d'électrons, la première structure ayant par exemple un agencement matriciel ou un agencement multi-linéaire ou un agencement linéaire ; l'agencement peut être périodique et régulier ou irrégulier.

De même, la deuxième structure a de préférence un agencement périodique des ouvertures de diaphragme, la deuxième structure ayant par exemple un agencement matriciel ou un agencement multi-linéaire ou un agencement linéaire, périodique et régulier ou irrégulier. Cet agencement peut être similaire à celui

de la première structure ou différent selon l'application.

Il est prévu qu'au moins un côté de la structure d'électrode de diaphragme soit plongé dans un
5 champ électrique d'accélération des électrons.

Le dispositif selon l'invention peut comporter également un système de focalisation électrostatique et/ou magnétique disposé au-delà de la deuxième structure, c'est-à-dire après l'intervalle
10 d'hybridation entre la première structure d'émission à faisceaux d'électrons et la deuxième structure d'ouverture de diaphragme. Avantageusement le dispositif pourra baigner dans un champ magnétique uniforme résultant d'un dispositif de projection
15 magnétique.

La première structure de source d'émission peut également comporter elle même un système d'électrodes de collimation électrostatique participant à la focalisation et aménagé au dessus de chaque source
20 d'émission implantées sur le substrat.

Il est prévu, selon l'invention, que la deuxième structure d'électrode de diaphragme soit soumise à un potentiel de polarisation et contribue ainsi elle-même au processus de focalisation des
25 faisceaux.

Selon un mode de réalisation perfectionné, la deuxième structure d'électrode de diaphragme présente des ouvertures de diaphragme dissymétriques d'un côté par rapport à l'autre côté de la paroi formée
30 par le diaphragme.

Selon une forme de réalisation, chaque ouverture de diaphragme comporte des bords d'ouvertures taillées en biseau, par exemple en biseau plan, ou des bords d'ouvertures de forme concave ou encore des bords d'ouvertures de forme convexe. Il est prévu, notamment, que chaque ouverture ou au moins une ouverture de diaphragme, présente une surface d'ouverture supérieure d'un côté du diaphragme par rapport à la surface d'ouverture opposée de l'autre côté du diaphragme. De façon avantageuse dans ce cas, il est prévu que les ouvertures de diaphragme soient orientées de sorte que l'ouverture de plus grande surface soit face à un champ électrique de valeur supérieure, à l'ouverture de surface plus petite.

Selon un autre mode de réalisation, la deuxième structure comporte deux niveaux d'électrodes ou deux niveaux de membranes métalliques ou conductrices, distinctes, séparées par un matériau isolant ou des couches diélectriques, de façon à contrôler indépendamment le champ électrique à l'entrée et la sortie de diaphragme.

Selon un autre mode de réalisation, il est prévu que chaque ouverture de l'électrode structurée soit soumise à une polarisation électrique différente des autres ouvertures, les ouvertures étant aménagées dans des portions de membrane conductrice ou métallique, séparées les unes des autres par des parties isolantes.

Selon un autre mode de réalisation, la première structure comporte un substrat, une cathode, des moyens émetteurs d'électrons, une grille

d'extraction, et dans lequel la deuxième structure forme des moyens de collection de courant, isolés de la grille d'extraction et disposés de manière à collecter une partie du courant émis par les moyens émetteurs, des
5 moyens de mesure du courant collecté, et des moyens pour contrôler, en fonction d'une mesure du courant collecté, le courant émis par les moyens émetteurs d'électrons.

De manière avantageuse, les moyens
10 émetteurs d'électrons comportent au moins une micro-pointe ou un nanotube.

Selon une forme de réalisation, les moyens de contrôle du courant émis par les moyens émetteurs d'électrons comprennent des moyens de polarisation en
15 impulsions de la grille d'extraction.

Selon une autre forme de réalisation, les moyens de contrôle du courant émis par les moyens émetteurs d'électrons comprennent des moyens de polarisation en impulsions de la cathode.

20 De manière avantageuse, le substrat est un substrat CMOS.

Selon une forme particulière de réalisation, des traversées électriques permettant de connecter les moyens de collection et la grille
25 d'extraction au substrat CMOS.

Selon une autre forme particulière, les moyens de collection sont reliés par des moyens d'interconnexion électrique et mécanique formés par les billes ou un pilier à une zone conductrice.

30 De façon avantageuse, les moyens de mesure de courant sont situés dans le substrat.

On peut également prévoir que les moyens de mesure de courant soient réalisés sur un substrat sur lequel se situent les moyens de collection.

Avantageusement, les moyens de mesure de courant comportent un amplificateur sur lequel un condensateur ou une résistance est monté en contre-réaction. Et en particulier, les moyens de mesure de courant comportent un montage de mesure par miroir de courant.

Préférentiellement, les ouvertures sont circulaires ou comportant des secteurs circulaires.

BREF EXPOSE DES DESSINS

D'autres caractéristiques, objectifs et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description ci-après de modes de réalisation de l'invention, faite à titre d'exemple non limitatif, en regard des dessins annexés, sur lesquels :

- les figures 1A et 1B représentent un dispositif d'émission électronique multifaisceaux à structure matricielle, composée de plusieurs colonnes miniatures individuelles assemblées les unes à côté des autres, selon l'état de la technique ;

- la figure 2 représente un dispositif d'émission électronique multifaisceaux à structure matricielle intégrée sur un substrat, avec un système de focalisation primaire à l'arrière du substrat, selon l'état de la technique ;

- les figures 3A et 3B représentent un dispositif d'émission électronique multifaisceaux à structure intégrée sur un substrat comportant plusieurs

niveaux d'électrodes de focalisation au dessus de chaque source, selon l'état de la technique ;

- la figure 4 représente un schéma synoptique de la structure d'un dispositif d'émission électronique multifaisceaux hybride programmable, selon
5 l'invention ;

- la figure 5 représente une vue d'ensemble d'un dispositif d'émission électronique multifaisceaux hybride programmable, couplé avec une
10 système de focalisation électromagnétique et une anode d'accélération électrostatique, selon l'invention ;

- la figure 6 représente de façon détaillée, un mode de réalisation de la structure d'émission de faisceaux d'électrons du dispositif,
15 selon l'invention ;

- les figures 7A et 7B représentent des détails de deux modes de réalisation de la structure d'électrode comportant des ouvertures de diaphragme du dispositif, selon l'invention ;

20 - les figures 8A, 8B et 8C représentent des détails de modes de réalisation des ouvertures de diaphragme du dispositif, selon l'invention ;

- la figure 9 représente des détails d'un mode de réalisation de système d'hybridation entre la
25 structure de diaphragme et la structure d'émission de faisceaux d'électrons du dispositif, selon l'invention ;

- la figure 9' représente une autre forme de réalisation du système d'hybridation du dispositif,
30 selon l'invention, les vues 9'A, 9'B et 9'C représentant des alternatives de réalisation du système

d'hybridation en fonction de la structure de la matrice d'émission ;

- les figures 10, 11 et 12 représentent des vues d'ensembles de dispositifs comportant une structure de source d'émission hybridée avec une structure d'ouverture de diaphragme, selon l'invention, disposés selon un agencement matriciel bidimensionnel, un agencement linéaire et un agencement multi-linéaire ;

- les figures 13a à 16B illustrent un mode de réalisation du dispositif.

EXPOSÉ DETAILLE DE MODES DE REALISATION DE L'INVENTION

Les figures 4 et 5 montrent l'architecture générale du dispositif d'émission électronique mis en œuvre par l'invention.

Selon la vue d'ensemble de réalisation d'un dispositif complet illustré figure 5, le dispositif d'émission électronique selon l'invention peut notamment être mis en œuvre au sein d'un système global d'émission électronique multifaisceaux à haute résolution 5 qui comprend une anode 40 et un système de focalisation 4 appelé ici « optique de focalisation ».

L'optique de focalisation 4 est destinée à focaliser chaque faisceau d'électron 59 émis par une source ponctuelle à effet de champ, sous forme d'un spot électronique, c'est-à-dire d'une image ponctuelle concentrée dans le plan focal, matérialisé ici par l'anode 40, qui peut être aussi un écran ou encore un échantillon, qu'il s'agisse d'un échantillon microscopique à observer ou d'un substrat semi-

conducteur (« wafer ») recouvert d'une résine à insoler. L'anode 40 sert à accélérer les faisceaux d'électrons.

5 L'optique de focalisation 4 peut être un système de projection magnétique, ou un système combinant des lentilles électrostatiques et/ou magnétiques. Dans le cas d'une projection magnétique, l'optique de focalisation 4 est répartie sur l'ensemble du dispositif.

10 La figure 4 représente l'architecture du dispositif d'émission électronique 50 lui-même, selon l'invention.

Le dispositif, selon l'invention, comprend une première structure 6 formée par exemple d'une
15 plaquette de substrat semi-conducteur 60, par exemple en silicium, sur lequel est implanté un circuit d'adressage, en technologie CMOS par exemple, et comportant une pluralité de sources 61 d'émission de faisceaux d'électrons, agencées sous forme matricielle
20 ou du moins selon un agencement périodique régulier, ou irrégulier.

Le dispositif 50 selon l'invention, comporte d'autre part, une deuxième structure 7 formée par une électrode structurée 70 comportant une
25 pluralité d'ouvertures de diaphragme 8 aménagées également selon un agencement matriciel ou du moins selon un agencement périodique régulier, ou irrégulier, et qui avantageusement correspond à l'agencement des sources d'émission de la première structure 6.

30 Selon l'invention, la plaquette de substrat 60 comportant la pluralité de source d'émission à effet

de champ 61 formant la structure de base 6, est hybridée avec l'électrode structurée 70 comportant la pluralité d'ouvertures de diaphragme 8 et formant la deuxième structure 7, par l'intermédiaire d'un système
5 d'hybridation 9-9'.

La deuxième structure 7 comportant des ouvertures de diaphragme 8, est de préférence réalisée dans une électrode métallique ou dans une membrane conductrice 70. De façon générale, une partie ou la
10 totalité de la deuxième structure 7 est conductrice pour pouvoir évacuer les charges électroniques transférées par les électrons dont la propagation est interrompue par le diaphragme 70.

Selon le mode de réalisation illustré
15 figure 4, le système d'hybridation 9 se compose de billes d'hybridation 90 composées de manière avantageuse de métal ou d'alliage métallique fusible et de forme sphérique ou oblongue, en forme de tampon ou de champignon par exemple.

20 Le système d'hybridation 9, 9' permet avantageusement de positionner horizontalement et verticalement la structure 7 sur la structure 6. La distance d'écartement X entre ces deux structures est définie par la taille des billes d'hybridation 90. Elle
25 peut être choisie sur une plage très étendue de valeur allant de l'ordre du micromètre jusqu'à l'ordre du millimètre.

Comme schématisé sur la figure 4, l'avantage de l'invention est que chaque ouverture 8
30 transmet seulement un faisceau d'électrons émergent 59 de divergence réduite, par rapport à la divergence

initiale du faisceau d'électrons 69 issu de la source émettrice 61. Cette divergence devient en particulier indépendante des instabilités des sources et des inhomogénéités d'émission des sources.

5 Selon le schéma de la figure 4, le dispositif selon l'invention comporte trois structures distinctes :

- la structure matricielle d'émission 60 qui comporte une pluralité de source d'émission de faisceaux d'électrons 61,
- 10 - une structure 7 d'électrode comportant une pluralité d'ouvertures de diaphragme structuré, et
- un système d'hybridation 9-9' intercalé entre la structure matricielle d'émission 6 et
- 15 l'électrode structurée 7.

L'invention permet de contrôler, d'une part, les dimensions des ouvertures 8, et, d'autre part, l'espacement de la deuxième structure 7 de diaphragme par rapport à la première structure 6 d'émission d'électrons, ce qui permet de contrôler la divergence de chaque faisceau d'électrons émergeant d'une ouverture de diaphragme et d'obtenir la divergence souhaitée. Avec une optique de projection magnétique raisonnable (correspondant à un champ

20 magnétique uniforme de 0,3 teslas), une divergence de quelques degrés permet d'envisager la focalisation des faisceaux sous forme de spots ponctuels d'une résolution d'ordre nanométrique.

L'électrode 70 percée d'ouvertures de diaphragme 8, qui forme la deuxième structure 7, a, lorsqu'elle est placée dans un champ d'anode non nul,

30

elle-même un effet de lentille. Cet effet doit être contrôlé car il peut selon les cas gêner ou participer à la focalisation.

Il est prévu en effet, pour la plupart des applications, que le dispositif complet 5 baigne dans un champ électrique d'accélération, un tel champ électrique E uniforme pouvant être généré par la polarisation de la matrice d'émetteur 60, de l'électrode hybridée 70 et d'une anode 40 qui fait face au dispositif d'émission d'électrons 50. Chaque ouverture 8 aménagée dans l'électrode hybridée 70 a alors un effet de lentille de focalisation. Selon un mode de réalisation avantageux, les ouvertures du diaphragme 8 peuvent avoir un profil taillé en biseau, ce qui permet de limiter les aberrations du faisceau électronique auprès du bord des ouvertures et d'augmenter la résolution accessible avec ce dispositif.

C'est pourquoi, le dispositif d'émission électronique 50, selon l'invention, s'intègre avantageusement comme source d'émission dans un système électronique multifaisceaux à haute résolution, comme celui illustré figure 5 qui comprend un système de focalisation 4 et une anode 40 d'accélération des faisceaux d'électrons 59/49.

L'invention permet d'obtenir une série de faisceaux d'électrons parallèles 59 à la sortie du dispositif d'émission électronique 50, chaque faisceau présentant seulement un angle de divergence de l'ordre d'une fraction de degré à quelques degrés. En mettant en œuvre un système 4 de focalisation (par exemple un

système de projection magnétique générant un champ magnétique B de l'ordre de quelques centièmes de Tesla à plusieurs dixièmes de Tesla), l'invention permet d'obtenir des résolutions nanométriques.

5 L'invention permet ainsi avantageusement :

- la réalisation séparée d'une première structure 6 comportant une matrice à une ou deux dimensions de sources d'émission de faisceaux d'électrons, et d'une deuxième structure 7 comportant
10 une matrice d'ouvertures de diaphragme ;
- le report de la deuxième structure 7 sur la première structure 6 ;
- le contrôle de l'espacement X entre la deuxième structure 7 et la première structure 6 ;
- 15 - le contrôle d'alignement entre les ouvertures 8 de la deuxième structure 7 et les sources d'émission 61 de la première structure 6 ; et,
- la mise en contact électrique entre certaines parties conductrices 60 de la première
20 structure 6 et certaines parties conductrices 70 de la deuxième structure 7.

Maintenant, des exemples de réalisation de la première structure d'émission d'électrons, de l'électrode de diaphragme formant la deuxième
25 structure, des ouvertures de diaphragme ainsi que du système d'hybridation vont être détaillés ci-après.

La figure 6 représente un exemple de réalisation de la structure d'émission de faisceaux d'électrons mis en œuvre selon l'invention.

30 Comme schématisé sur la figure 6, la structure de source d'émission d'électrons est intégrée

sur un support 60 de substrat semi-conducteur, par exemple du silicium, sur lequel est implanté un circuit intégré tel qu'un circuit d'adressage matriciel pour écrire et programmer les faisceaux d'électrons, pouvant
5 comporter des portes logiques ou des mémoires, réalisé en technologie CMOS (technologie d'implantation de composant sur Semiconducteur à Oxyde de Métal Complémentaire).

Les sources émettrices d'électrons 62 sont
10 implantées à la surface du substrat 60 qui est relié à la masse. Les émetteurs 62 peuvent être constituées de pointes métalliques ou de pointes semi-conductrices, de tubes nanométriques en fibres de carbone (en anglais « carbon nanofibers »), voire de films minces en
15 carbone ou en silicium poreux par exemple. Plusieurs pointes émettrices 62 peuvent éventuellement être regroupées pour constituer une seule source 61 d'émission électronique. Les sources émettrices 62 peuvent être implantées en réseau matriciel à une
20 dimension ou à deux dimensions, notamment selon un agencement périodique régulier à deux dimensions, ou un agencement linéaire à pas régulier à une dimension, ou un agencement multilinéaire sur plusieurs axes parallèles à une dimension, ou encore selon un
25 agencement à pas irrégulier. Les sources émettrices 62 sont déposées dans des ouvertures aménagées dans une couche diélectrique 63 en matériau isolant, par exemple une couche d'oxyde. L'épaisseur de la couche d'oxyde 63 est de l'ordre de quelques dizaines à quelques milliers
30 de nanomètres. Un niveau de métallisation 64 est déposé à la surface de la couche d'isolant 63 pour former une

électrode d'extraction polarisée à une tension positive V_g . Des ouvertures, typiquement circulaires, sont aménagées dans l'axe des sources émettrices 62 de façon à former une grille annulaire autour de chaque pointe émettrice 62 qui constitue une cathode. L'ouverture de la grille annulaire peut atteindre une dimension de l'ordre de quelques dixièmes de micromètres à quelques micromètres, suivant le type de source émettrice utilisée.

Selon l'alternative de réalisation illustrée sur la figure 6, l'électrode d'extraction 64 est surmontée par une autre couche diélectrique 65 et par un autre niveau de métallisation 66 formant une seconde électrode isolée électriquement de l'électrode d'extraction 64. Cette seconde électrode 66 est percée d'ouvertures, circulaires typiquement, de dimensions généralement supérieures aux ouvertures de grille d'extraction de la première électrode 64. La seconde électrode 64 est polarisée à une tension V_e , de façon à former un premier niveau de lentilles de focalisation. L'épaisseur typique des électrodes conductrices est de l'ordre de quelques centaines de nanomètres.

Selon l'invention, l'électrode de diaphragme 70 qui constitue la deuxième structure 7 est reportée par hybridation 9 sur la première structure d'émission 6 formée par la plaquette de substrat de base 60, sur laquelle est implanté l'arrangement matriciel des sources émettrices à effet de champ 61.

L'hybridation consiste à reporter et à assembler la deuxième structure 70 sur la première

structure 60 en disposant, de façon intercalaire, des moyens d'hybridation 9 et 9'.

Selon le mode de réalisation décrit précédemment (figure 4), les moyens d'hybridation 9
5 sont formés par des billes métalliques 90. Dans une première forme de réalisation, les billes d'hybridation sont composées d'alliages fusibles de métaux. Les billes peuvent être de forme circulaire, oblongue ou de toute autre forme, par exemple en forme de champignon
10 notamment.

La hauteur X des billes d'hybridation 90 permet de contrôler l'espacement entre l'électrode de diaphragme 70 qui forme la deuxième structure 7 et le substrat d'émission 60 qui forme la première structure
15 de base 6. Les billes d'hybridation 90 ont de préférence des dimensions micrométriques, ces microbilles ayant de préférence une taille comprise entre un micromètre et plusieurs centaines de micromètres. De tels moyens d'hybridation permettent de
20 maintenir une distance d'écartement X entre la deuxième structure 7 et la première structure 6 comprise entre une fraction de micromètre et un millimètre, selon les moyens d'hybridation utilisés.

Les techniques d'hybridations par bille à
25 alliage fusible permettent en outre de réaliser un alignement automatique et contrôlé (au micromètre près) des ouvertures 8 de diaphragme de la deuxième structure 7 par rapport aux sources émettrices 61 de la première structure 6. C'est la mise en fusion des billes qui
30 permet (via des forces de tension superficielles) de réaliser cet auto-alignement entre les structures 6 et

7. Cette technique permet donc notamment un auto-alignement entre les moyens d'émission de faisceaux d'électrons et les moyens de réduction de la divergence selon l'invention.

5 Dans le cas d'une hybridation par billes d'or, l'assemblage s'effectue non pas par fusion des billes mais par thermocompression. La précision d'assemblage est alors donnée par la précision des machines d'alignement des structures assemblées. Ces
10 différentes techniques d'hybridation sont par exemple décrites dans l'article : « Electronic production and test - Advanced Packaging », p. 32 - 34, Avril 1999.

Les figures 9 à 9'C illustrent plusieurs configurations d'hybridation à l'interface entre la
15 deuxième structure d'électrode de diaphragme 70 et la première structure de base d'émission électronique 60.

La figure 9 montre un premier mode de réalisation dans lequel les billes d'hybridation 90 sont intercalées dans les zones périphériques du
20 dispositif entre les bords de la deuxième structure 7 et les bords de la première structure 6. Ainsi, selon ce mode de réalisation, les billes d'hybridation 90 sont disposées en dehors des zones de propagation des faisceaux d'électrons et à l'endroit où l'électrode de
25 diaphragme 70 qui forme la seconde structure 7 peut être considérablement épaissie pour renforcer sa tenue mécanique.

La figure 9' représente un autre mode de réalisation dans lequel, plusieurs microbilles
30 d'hybridation 90 sont disposées, non seulement dans les zones périphériques entre la bordure de l'électrode de

diaphragme 7 et la bordure de la plaque de substrat 60 formant la deuxième structure d'émission électronique 6, mais également dans la zone centrale correspondant à la partie active du substrat 60 comportant les sources d'émissions d'électrons 61 et la zone centrale de l'électrode de diaphragme 70 qui comporte les ouvertures 8 de diaphragme. Les microbilles d'hybridation 90 sont alors disposées autour de chaque cellule d'émission à effet de champ, et se dressent comme des colonnes dans les intervalles séparant les espaces de propagation des faisceaux d'électrons parallèles.

Les microbilles d'hybridation disposées dans la zone centrale ou partie active du dispositif ont pour fonction, alternativement ou cumulativement, de renforcer la tenue de l'assemblage mécanique entre la mince électrode de diaphragme 70 (deuxième structure) et la plaquette de substrat 60 (première structure), et/ou de mettre en contact électrique les parties conductrices de l'électrode de diaphragme 70 avec certaines parties conductrices de la plaquette de substrat 60.

Une telle disposition s'applique particulièrement à la réalisation d'un dispositif selon l'invention comportant une électrode de diaphragme 7 à structure réticulée ou alvéolaire et comportant des cloisons d'isolants séparant des caissons conducteurs dans lesquels sont aménagées les ouvertures de diaphragme 8.

La figure 9'A illustre une première forme de réalisation dans lequel les microbilles

d'hybridation 91 disposées dans la zone centrale mettent en contact directement des parties du substrat 60 avec les zones conductrices 70 entourant les ouvertures 80.

5 La figure 9'B illustre une variante de réalisation dans laquelle les microbilles d'hybridation 92 de la zone centrale prennent appui sur l'électrode 64 de grille d'extraction des électrons déposée sur une couche diélectrique qui la sépare et l'isole du
10 substrat 60, dans lequel sont aménagées ou implantées les sources émettrices d'électrons 61. Ici, les billes d'hybridation 92 relie électriquement les zones de l'électrode de diaphragme 70 s'étendant autour des ouvertures 80 avec l'électrode d'extraction
15 électronique 64 qui est soumise à un potentiel ou une tension de grille d'extraction V_g .

 La figure 9'C illustre une autre variante de réalisation dans laquelle des microbilles d'hybridation 93 prennent appui sur l'électrode de
20 focalisation 66 qui est prévue dans certaines formes de réalisation de la première structure 6, par exemple celui de la figure 6, et qui surmonte l'électrode de grille d'extraction électronique 64 déposée au dessus du substrat semi-conducteur 60 dans lequel sont
25 implantées les sources émettrices d'électrons 61.

 Dans cet exemple de réalisation, les microbilles d'hybridation disposées dans la partie centrale permettent de relier électriquement les zones de l'électrode de diaphragme 70 entourant les
30 ouvertures 80 avec l'électrode de focalisation 66 qui

est soumise à un potentiel ou une tension de polarisation V_e .

Les figures 7A et 7B représentent deux modes de réalisation de la deuxième structure et montrent l'allure générale de l'électrode hybridée 70. Les profils en biseau des ouvertures de diaphragme, détaillés ultérieurement, ne sont pas représentés sur les figures 7A et 7B.

La figure 7A représente un premier mode de réalisation dans lequel la deuxième structure est composée d'une membrane 70 conductrice surmontée d'une surépaisseur 72 du matériau conducteur ou de l'épaisseur 72 de dépôt d'une couche d'un autre matériau qui peut être indifféremment conducteur, semi-conducteur ou diélectrique. L'épaisseur de la membrane conductrice 70 de diaphragme qui intercepte les faisceaux d'électrons autour des ouvertures de diaphragme 8, est de l'ordre d'une fraction de micromètres (par exemple $0,1\ \mu\text{m}$) à plusieurs centaines de micromètres (par ex. $500\ \mu\text{m}$). En dehors des zones entourant les ouvertures de diaphragme 8, l'épaisseur de la deuxième structure peut atteindre des valeurs beaucoup plus importantes, par exemple des épaisseurs cumulées allant jusqu'à environ un millimètre, notamment sur les bords, à la périphérie de la deuxième structure afin d'améliorer la tenue mécanique ou la résistance aux déformations d'origine thermique de l'ensemble de la deuxième structure 7A.

La partie conductrice 70 de l'électrode hybridée 7A est soumise à un potentiel de polarisation V_d pour contrôler le champ électrique d'accélération

des électrons entre le dispositif d'émission et l'anode et/ou obtenir un effet de focalisation électrostatique, comme détaillé par la suite.

La figure 7B représente un autre mode de réalisation plus complexe de la deuxième structure 7B qui comporte ici deux électrodes successives 70 et 75, afin d'augmenter les stratégies de polarisation de la structure 7B.

Sur la réalisation de la figure 7B, comme dans l'exemple de la figure 7A, la deuxième structure 7B comporte une première membrane 70 conductrice ou semi-conductrice formant une première électrode percée d'ouvertures de diaphragme 8. La membrane est surmontée d'une couche de matériau diélectrique 71, d'épaisseur moyenne de l'ordre du micromètre, percée d'embrasures 73 aux emplacements correspondant au droit des ouvertures de diaphragme 8, les embrasures 73 étant de préférence de dimensions supérieures à la dimension des ouvertures de diaphragme elles-mêmes. L'épaisseur de la partie conductrice 70 peut être réduite à une épaisseur de l'ordre de quelques dixièmes de micromètres. La couche diélectrique est surmontée d'une membrane uniforme conductrice 75 qui forme une seconde électrode. L'épaisseur de la couche diélectrique 71 isolant électriquement les électrodes 70 et 75 entre elles, peut aller du micron à la dizaine de microns. L'épaisseur de la membrane conductrice 70 dans les zones qui interceptent les faisceaux d'électrons, autour des ouvertures de diaphragmes 8, peut aller de l'ordre d'un dixième de micromètre à plusieurs centaines de micromètres (par exemple 500 μm).

Toutefois, la seconde électrode 75 peut être surépaissie ou surmontée d'une couche 76-77 d'un autre matériau conducteur, semi-conducteur ou diélectrique, dont l'épaisseur peut atteindre jusqu'à environ un millimètre. Ces surépaisseurs, qu'elles soient aménagées dans le corps même du matériau de la seconde électrode 75, ou dans un matériau différent, conducteur ou isolant 77, sont disposées en dehors des zones d'ouvertures de diaphragme 8, notamment sur les bords périphériques de l'électrode pour améliorer la tenue mécanique ou thermique de la deuxième structure 7B. Des embrasures 78 sont alors aménagées au droit des ouvertures de diaphragme 8. Selon l'exemple de la figure 7B, les embrasures 78 aménagées dans les surépaisseurs de la seconde électrode ont des dimensions supérieures aux dimensions des ouvertures de diaphragme 8 aménagées dans la seconde électrode 75 elle-même.

Le diamètre des plus petites ouvertures de diaphragme 8 aménagées dans les électrodes peut atteindre un dixième de micromètre à plusieurs dizaines de micromètres (par exemple 50 μm), la dimension supérieure des ouvertures de diaphragme les plus grandes n'étant pas limitée.

Chaque électrode 70,75 formée par une membrane conductrice est soumise à un potentiel respectif de polarisation pour former un champ d'accélération électrostatique des électrons de chaque côté de la deuxième structure et entre les deux électrodes 70, 75.

Dans les exemples de réalisation de la figure 7A et 7B, chaque électrode 70 ou 75 est soumise à un potentiel V_d , V_{d1} ou V_{d2} uniforme sur toute la surface de chaque électrode 70 ou 75. Toutes les
5 ouvertures de diaphragmes 8 de chaque électrode 70 ou 75 sont donc soumises aux mêmes potentiels électriques.

Alternativement, selon un autre mode de réalisation non illustré, il est prévu que les ouvertures puissent être soumises respectivement à des
10 potentiels individuels distincts. La deuxième structure peut ainsi être implantée dans un substrat ou un matériau à structure alvéolaire ou réticulée, comportant des caissons de silicium séparés par des bandes d'isolants, notamment en utilisant des briques
15 selon la technologie connue sous l'appellation SIBOX. Dans ce type de matériau technologique, chaque caisson semi-conducteur est isolé électriquement des autres caissons semi-conducteurs voisins. La deuxième structure 7 est implantée dans ce substrat ou ce
20 matériau technologique, chaque caisson individuel isolé étant alors percé d'une ou de plusieurs ouvertures de diaphragme 8. L'ouverture ou le groupe d'ouvertures de diaphragme appartenant à un caisson peut alors être soumis individuellement à un potentiel respectif, de
25 façon à focaliser, individuellement ou par groupe, chaque faisceau d'électrons qui traverse ces ouvertures de diaphragme.

Un avantage de ce mode de réalisation est de permettre de contrôler la divergence et la qualité
30 optique des faisceaux transmis.

La figure 8C est un diagramme faisant apparaître l'allure des trajectoires des électrons issus d'une source d'émission ponctuelle au travers d'une ouverture de diaphragme 70 à profil biseauté.

5 Comme on le voit dans l'angle inférieur de la figure 8C, le premier effet de l'ouverture de diaphragme est de limiter l'ouverture angulaire du faisceau d'électrons transmis à travers la deuxième structure de diaphragme 70. Par exemple, avec une ouverture de
10 diaphragme de dimension de 5 micromètres, disposée à une distance de 20 micromètres de la source émettrice ponctuelle, la partie la plus étroite de l'ouverture de diaphragme 84 limite l'ouverture angulaire du faisceau à +/-4 degrés d'angle.

15 Sur l'exemple de la figure 8C, le champ électrique est nul ($E_1=0$) entre la source émettrice située à l'origine et le premier côté 85 de la structure de diaphragme 70. De l'autre côté de la deuxième structure 70, un champ électrique uniforme de
20 l'ordre de 1 volt/micromètre ($E_2=10^6$ V/m) est imposé par une anode (non représentée) qui fait face à l'électrode 70 formée par la deuxième structure. L'ensemble des trajectoires d'électrons est soumis à un champ magnétique uniforme de l'ordre de quelques
25 dixièmes de Tesla (par exemple 0,3 T). On observe alors que les trajectoires des électrons 86, 87, 88, 89 se recourbent et se rabattent vers l'axe de propagation 89 sous l'effet de l'accélération électrostatique et de la focalisation magnétique. Le profil d'ouverture en
30 biseau 80 permet de limiter les aberrations du faisceau électronique à la traversée du diaphragme 70, le long

du bord d'ouverture 83. L'effet de diaphragme est réalisé dans la partie de la deuxième structure de diaphragme 70 où l'ouverture est la plus réduite 84. Une telle disposition permet d'obtenir une excellente
5 qualité du faisceau électronique. Le biseautage de la partie supérieure 83 du diaphragme permet d'atteindre une résolution inférieure à 10 nm et ainsi de diviser par cinq les dimensions du spot (point de focalisation) obtenu avec le dispositif selon l'invention, par
10 rapport à des ouvertures de diaphragme sans biseautage, ce qui est la conséquence de la réduction des aberrations à la traversée du diaphragme 70. Ainsi de façon avantageuse le biseautage des ouvertures de diaphragme du dispositif selon l'invention, permet de
15 quintupler la résolution du point de focalisation d'un faisceau électronique.

En outre, l'invention prévoit que le champ électrique E n'est pas uniforme à la traversée du diaphragme, chaque côté de l'électrode de diaphragme
20 étant exposé à des champs électriques E_1, E_2 de valeurs différentes.

Selon l'invention, l'orientation de l'ouverture du biseau 83 dépend de préférence de l'orientation du gradient de champ électrique à la
25 traversée du diaphragme 70. Il est prévu que la partie la plus étroite 81 ou 84 de l'ouverture 80 de diaphragme fait face à un champ électrique moins important que la partie la plus large 82 ou 83 de l'ouverture 80 de diaphragme. L'orientation du biseau
30 83 de l'ouverture 80 dépend donc de la polarisation de l'électrode 70 vis-à-vis du dispositif d'émission

électronique 60 et vis-à-vis de l'anode accélératrice ou focalisatrice 40, par exemple.

La figure 8A représente un premier mode de réalisation dans lequel les ouvertures 80 de diaphragme 70 forment des biseaux 83 débouchant dans la direction de propagation des faisceaux électroniques et sont soumis à un gradient de champ électrique $E1/E2$ croissant dans le sens de propagation des électrons. Le biseau 83 de l'ouverture 80 est orienté de sorte que le premier côté du diaphragme 70 présentant l'ouverture la plus étroite 81, ou présentant la section d'ouverture inférieure 81, est exposé à un champ électrique $E1$ ayant une première valeur inférieure à une deuxième valeur de champ électrique $E2$ qui baigne l'autre côté 82 du diaphragme 70. Le second côté de l'ouverture 80 qui présente une largeur d'ouverture débouchante 82 supérieure à la première ouverture 81, ou du moins une section d'ouverture d'aire 82 supérieure à l'aire d'ouverture 81 du premier côté, est exposé à une deuxième valeur de champ électrique $E2$ supérieure à la première valeur de champ électrique $E1$ qui fait face au premier côté 81 du diaphragme 70.

En particulier, le champ électrique peut être absent, c'est-à-dire de valeur sensiblement nulle ($E1 \cong 0$) entre le diaphragme et le dispositif d'émission. Ce cas particulier correspond au cas où l'électrode de la structure de diaphragme 70 est polarisée au même potentiel électrique que le dispositif d'émission 50 ($Vd=Vg$ ou $Vd=Ve$ ou $Vd1=Vg$ ou $Vd1=Ve$).

Dans le cas de la figure 8A, après avoir été diaphragmés à l'endroit où l'ouverture 80 de diaphragme est la plus étroite 81, les faisceaux d'électrons sont en second lieu focalisés ou accélérés par le fort champ électrique E2 à l'endroit où l'ouverture 80 est la plus large 82. De forts effets électrostatiques se produisent dans cette zone, mais comme les trajectoires des faisceaux d'électrons transmises à ce niveau passent alors plus loin des bordures d'extrémités d'ouvertures, les trajectoires subissent moins d'aberrations.

Le dispositif, selon l'invention comporte des moyens pour appliquer des potentiels de polarisation ou des tensions électriques à chacune des électrodes précitées.

La figure 8B expose un autre mode de réalisation dans lequel, cette fois, les faisceaux d'électrons sont exposés à un gradient de champ électrique décroissant dans leur sens de propagation, lors de la traversée des ouvertures 80' de diaphragme 70.

Dans ce cas, comme illustré sur la réalisation de la figure 8B selon l'invention, les ouvertures à profil taillées en biseau sont de préférence orientées de façon à ce que chaque ouverture 80' de diaphragme s'étrécisse dans le sens de propagation des faisceaux d'électrons. Dans ce cas, les ouvertures 80' de diaphragme taillées en biseau sont orientées de sorte que l'ouverture de largeur supérieure 81' est disposée du premier côté face aux sources émettrices d'électrons, et sont exposées à un

champ électrique de valeur $E1'$ plus importante que la valeur de champ électrique $E2'$ qui baigne le second côté du diaphragme 70. Le second côté du diaphragme comporte des ouvertures 82' présentant une largeur plus étroite ou une section d'ouverture 82' d'aire inférieure, ces étroites ouvertures 82' faisant face à l'anode 40 accélératrice ou focalisatrice.

Dans le cas de la figure 8B, les faisceaux d'électrons sont exposés à un gradient décroissant de champ électrique $E1'/E2'$ dans leur sens de propagation et sont en premier lieu, focalisés ou accélérés par le fort champ électrique $E1'$ à l'endroit où l'ouverture 80' est la plus large 81', avant d'être diaphragmés à l'endroit où l'ouverture 80' de diaphragme est la plus étroite 82', qui se trouve être l'endroit où la valeur de champ électrique $E2'$ est la plus faible, voir nulle. Eventuellement, le champ électrique peut en effet être absent du deuxième côté du diaphragme 70, ce qui correspond par exemple à un cas où l'anode est polarisée au même potentiel que le diaphragme 70.

De façon avantageuse selon l'invention, l'effet de diaphragme est réalisé du côté du diaphragme où le champ électrique $E2$ est le plus faible qui correspond au côté d'ouvertures 82' plus étroites. Les trajectoires des faisceaux d'électrons qui passent tout près du bord de l'ouverture subissent alors peu d'aberrations.

On constate que, grâce à l'invention, plus l'angle de biseau des ouvertures est important, plus les effets précédents sont marqués et moins il se produit d'aberrations à la traversée du diaphragme. La

valeur de l'angle du biseau des ouvertures est seulement limitée par la densité d'émetteur à la surface du dispositif.

La figure 8C montre ainsi un profil
5 d'ouverture de diaphragme taillé en biseau avec un fort angle θ d'inclinaison d'environ 15° par rapport à l'axe de propagation des électrons. Dans d'autres modes de réalisations, non illustrées, les ouvertures de diaphragme peuvent être taillées en biseau ayant un
10 profil non linéaire, c'est-à-dire que le biseau n'est pas rigoureusement plat mais peut être convexe ou concave par exemple.

De tels profils d'ouvertures sont également favorables à la réduction des aberrations lors de la
15 traversée du diaphragme par le faisceau d'électrons.

La réalisation d'un dispositif d'émission électronique selon l'invention peut faire l'objet de plusieurs formes de réalisations et variantes de l'architecture de base, en particulier d'un arrangement
20 matriciel à deux dimensions, d'un arrangement linéaire à une dimension ou d'un arrangement multi-linéaire à deux dimensions, à pas réguliers ou à pas irréguliers.

La figure 10 illustre une vue d'ensemble d'une réalisation d'une architecture matricielle à deux
25 dimensions à pas réguliers, comprenant un réseau de sources émettrices 6 et d'ouvertures 8 de diaphragme 7 disposées selon un quadrillage régulier.

La figure 11 illustre une vue d'ensemble d'une réalisation d'un dispositif d'émission
30 électronique selon l'invention, comprenant une structure d'émission 6 comportant une seule rangée de

sources et une structure de diaphragme 7 comportant une rangée d'ouvertures 8 correspondantes disposées en barrettes linéaire selon un arrangement périodique à une dimension à pas réguliers. Alternativement, les sources émettrices et les ouvertures 8 de diaphragme peuvent être disposées à intervalles irréguliers.

La figure 12 illustre une vue d'ensemble d'une autre réalisation de dispositif d'émission électronique selon l'invention, dans lequel la première structure 6 et la seconde structure 7 comprennent plusieurs rangées parallèles relativement espacées de sources émettrices et d'ouvertures 8 de diaphragme arrangées sur deux dimensions à pas périodiques réguliers. Alternativement, les sources émettrices et les ouvertures 8 de diaphragme peuvent être disposées à intervalles irréguliers.

L'espacement des sources émettrices et des ouvertures 8 correspondantes peut varier de l'ordre de un micromètre à une centaine de micromètre, le pas matriciel étant typiquement de quelques micromètres ou de quelques dizaines de micromètres, par exemple environ cinquante micromètres. Une telle structure s'intègre particulièrement avantageusement dans un système d'émission électronique multifaisceaux à haute résolution, selon le schéma de la figure 5B qui comprend en outre une optique de focalisation 57 et une anode d'accélération électrostatique. A la sortie des ouvertures de diaphragme du dispositif d'émission 50, l'ouverture angulaire des faisceaux est réduite à quelques degrés, voire en deçà du degré grâce à l'invention. L'optique de focalisation 57 est de

préférence une optique de projection magnétique générant un champ magnétique de l'ordre de quelques centièmes de Tesla à quelques Tesla, typiquement quelques dixièmes de Tesla. De façon avantageuse, un
5 tel dispositif selon l'invention permet d'obtenir des spots d'électrons ayant une résolution d'ordre nanométrique.

Sur les figures 13A à 16B, on peut voir un autre mode de réalisation dans lequel le diaphragme
10 forme également des moyens de collection d'une partie du courant émis par les moyens émetteurs de manière à collecter une partie du courant émis, et est raccordé à des moyens de mesure de cette partie de courant émis, lesdits moyens de mesure étant quant à eux reliés à des
15 moyens de polarisation des moyens émetteurs d'électrons.

Selon le mode de réalisation représenté aux figures 13A et 13B, les moyens émetteurs d'électrons comportent une cathode 120, des micro-émetteurs
20 d'électrons 124 (pointe ou nanotube) et une première grille d'extraction 126, la distance grille d'extraction-cathode étant réglée par l'épaisseur d'un diélectrique 128, qui est par exemple de l'ordre du micromètre. Des moyens de polarisation 134 permettent
25 de polariser respectivement la grille d'extraction et la cathode et ainsi de commander le courant émis par les micro-émetteurs.

Le dispositif de l'invention comprend également des moyens 140 de collection, par exemple
30 comportant une électrode ou une grille de collection,

peuvent être positionnées au-dessus du site d'émission. Ils sont reliés à des moyens 142 de mesure du courant.

Ces moyens de collection sont donc placés sur le trajet des électrons émis afin d'en prélever une
5 partie et de permettre le passage du reste des électrons émis vers l'anode. Pour cela, des orifices (ou ouvertures) sont prévus au niveau de ces moyens de collection. Ces orifices peuvent être circulaires, ovales ou rectangulaires, ils peuvent également
10 présenter d'autres géométries avantageuses. Comme illustré sur les figures 15A et 15B, ils peuvent aussi avoir la forme de secteurs circulaires 100, 102, 104 ou encore la forme illustrée en figure 15C (cercle échancré).

15 On peut, en fonction de la géométrie choisie et de la polarisation appliquée, déterminer, d'après les lois classiques de l'optique et de l'électromagnétique, la part des électrons collectés et celle des électrons effectivement transmis vers
20 l'anode. Ainsi, la mesure du courant collecté donnera une indication précise des électrons arrivant sur l'anode (et donc de la dose émise).

Par rapport à un orifice circulaire, ces orifices découpés des figures 15A - 15C permettent la
25 collection d'électrons à plusieurs niveaux de faisceau électronique et pas uniquement au niveau des bords du faisceau, permettant ainsi d'être moins sensibles aux inhomogénéités qui peuvent apparaître sur les bords. Ces orifices ont typiquement, en fonction de
30 l'application envisagée, des diamètres de l'ordre de quelques microns à quelques dixièmes de microns.

Les moyens 140 de collection de courant sont positionnés dans l'axe d'émission, la distance par rapport à la première grille d'extraction 126 étant réglée par des moyens 90 d'hybridation, par exemple une
5 micro-bille 90 ou tout autre moyen d'interconnexion (pilier,...). En fait, la grille ou les moyens de collection sont reliés par les moyens 90 à une zone 171 conductrice, située dans le dispositif classique d'émission au niveau de la grille d'extraction mais
10 isolée dans cette grille d'extraction par la zone isolante 127 (par exemple SiO_2). Les moyens d'hybridation 90 permettent de maintenir un écart entre ces éléments qui assure, combiné avec la zone isolante 127, l'effet d'isolation entre eux.

15 La hauteur de ces billes d'hybridation 90 permet de contrôler l'espacement entre l'électrode 140 et le substrat qui contient les moyens 124 d'émission.

De tels moyens d'hybridation permettent de maintenir une distance assez précise d'écartement entre
20 les moyens 140 et la grille d'émission 126, typiquement de l'ordre de quelques centaines de microns et ce, avec une précision de l'ordre d'une fraction de microns.

En plaçant les moyens 142 de mesure de courant (ampèremètre) dans le circuit d'alimentation
25 des moyens de collection, il est possible de mesurer le faisceau électronique, ou une grandeur proportionnelle au courant d'anode, et d'interagir sur le courant du micro-émetteur, soit via la commande de la grille d'extraction 126 et/ou via la commande de la cathode
30 120. Un ajustement peut être fait à l'aide de moyens de contre-réaction. Ces moyens de contre-réaction

peuvent par exemple être composés d'un convertisseur courant tension associé à un module d'amplification et au besoin à un inverseur. Ils permettent ainsi, à partir du courant collecté au niveau de la grille de collection, d'établir la tension à appliquer au niveau de la cathode et/ou de la grille d'extraction. L'invention permet donc de mettre en oeuvre des moyens de contrôle et de régulation de courant d'anode séparés de la grille d'extraction.

Les grilles 126 sont de type métallique. Plus généralement elles sont conductrices (par exemple en Silicium Polycristallin).

Les pointes émettrices 124 sont conductrices, par exemple en Silicium ou en molybdène.

La grille d'extraction 126 a par exemple une épaisseur de quelques centaines de nm à quelques micromètres.

L'épaisseur du diélectrique 128 est typiquement de quelques centaines de nm (par exemple comprise entre 0.4 et 0.7 μm).

La distance entre le substrat 120 et l'anode 136 est environ de 1 mm pour l'application envisagée. Elle peut varier de 10 μm à 10 mm selon l'application.

Un premier générateur de tension 134 établit par exemple une ddp positive entre la première grille d'extraction 126 et la cathode 120 pour permettre aux électrons de s'échapper de la pointe dans le vide. Le faisceau d'électrons s'oriente vers l'anode 136 avec une certaine ouverture angulaire. Pour recueillir les électrons, l'anode 136 est par exemple

portée à quelques centaines de Volts positivement. Les moyens 140 collectent des électrons, que les moyens 142 convertissent en mesure de courant, information que les moyens de contre-réaction peuvent utiliser pour réguler
5 l'extraction des électrons en fonction, par exemple, d'une valeur de consigne du courant émis.

Les fréquences de fonctionnement de la source sont de préférence dans le domaine des hautes fréquences, au-delà de 1 Mhz.

10 La réalisation physique des micro-sources connues selon l'art antérieur impose des structures non idéales. Des capacités parasites, entre la pointe 124 et la grille 140 induisent, notamment, des courants de déplacement importants, au moment des commutations.

15 Dans le mode de réalisation représenté sur les figures 13A et 13B, il est envisageable de connecter les grilles d'extraction 126 et de collection 140 à des blocs de contrôle de courant et de commande de grilles situés dans le substrat CMOS, par des
20 traversées électriques. Ces blocs de traitement utilisent une technologie mixte LV/HV (basse tension/haute tension), le contrôle et la commande se faisant en LVCMOS et le pilotage de l'émission en HVCMOS. Un procédé de fabrication collective permet
25 d'aligner la grille de collection 140 sur la pointe émissive 124.

Comme illustré sur la figure 13A, une tranche Silicium peut être utilisée comme substrat pour réaliser la grille de collection. Ce substrat pourra
30 alors également être utilisé pour réaliser, au même niveau que la grille de collection, les moyens de

mesure de courant et de traitement associé. On pourra ainsi parler de grille de collection « active ».

Un avantage de cette variante est d'augmenter la surface disponible pour réaliser les
5 blocs de traitement électronique et surtout de différencier la partie analogique basse tension au niveau du substrat silicium de la grille 140 de collection, et la partie analogique 134 de commutation haute tension au niveau du substrat silicium 160 de
10 base, limitant ainsi, entre autres, les problèmes de parasitage entre ces deux parties et permettant par ailleurs l'emploi de deux substrats de technologies complètement différentes.

Dans le dispositif illustré en figure 13B,
15 il s'agit d'une grille de collection « passive », où les moyens 142 de mesure de courant et le traitement du courant collecté sont localisés dans le substrat CMOS 160.

Dans une forme de réalisation, la commande
20 s'effectue par la grille d'extraction, le potentiel de cathode est maintenu à une tension constante, le potentiel de la grille d'extraction est lui pulsé entre un niveau haut et un niveau bas (voir la tension V_g sur le chronogramme de la figure 16A). Le niveau haut
25 correspond à une période pendant laquelle le micro-émetteur émet, le niveau bas correspond à une période pendant laquelle le micro-émetteur n'émet pas (voir le courant I_a d'anode sur la figure 16A).

Selon l'invention il est possible, à partir
30 du courant I_g collecté au niveau de la grille de collection (proportionnel au courant d'anode dans sa

partie centrale), d'agir sur le potentiel de la grille d'extraction pour moduler l'émission du micro-émetteur. On peut pour cela, soit moduler le niveau haut de la tension V_g , soit modifier la durée d'émission en jouant
5 sur la durée de ce niveau haut.

On peut constater, sur la figure 16A, qu'au moment des commutations du potentiel de la grille d'extraction, des pics de courant importants, transitoirement au niveau du courant de la grille de
10 collection. Il peut donc être intéressant de différer la mesure du courant de collection de manière à éviter les perturbations liées à ces commutations.

Dans une autre forme de réalisation, la commande du micro-émetteur est régie par la cathode. Le
15 potentiel de la grille d'extraction est donc constant alors que le potentiel de cathode est pulsé entre un niveau haut et un niveau bas, ce dernier niveau correspondant à la période d'émission du micro-émetteur.

20 Selon l'invention, on peut à partir du courant I_g collecté, agir sur le potentiel de la cathode ($V_{cathode}$) pour moduler l'émission du micro-émetteur. On peut pour cela moduler en amplitude ou en durée le niveau bas de la tension de cathode.

25 On peut constater, figure 16B, que le courant collecté dans le cas où la commande du microémetteur est régie par la cathode, est moins sensible aux commutations de la tension de cathode que dans le cas précédent.

30 L'exemple de la figure 14A illustre les moyens de mesure du courant d'un signal de mesure est

amplifié par un amplificateur 180 sur lequel un condensateur 182 est monté en contre réaction. Il est alors possible de convertir le courant mesuré en tension, grandeur plus facilement exploitable avec un nombre limité de composants (CTIA). La variation de la tension de sortie s'exprime alors par :

$$\Delta V_{s(G)} = \frac{-I_{gate} * T}{Cfb}$$

où T représente le temps d'intégration du courant, ou le temps d'analyse. Cette structure est assez peu sensible aux variations rapides du courant. La valeur du condensateur 182 est par exemple de l'ordre de 10fF, ce qui conduit à des sensibilités de l'ordre de 20µV/électron.

La structure illustrée en figure 14B, avec une résistance 184 de contre-réaction, permet de représenter des variations instantanées de tension de sortie sur des variations instantanées du courant d'entrée. La variation de tension de sortie s'exprime dans ce cas :

$$\Delta V_s = - R.I_{gate}$$

Enfin, la figure 14C illustre un montage avec mesure par miroir de courant : une image du courant de grille de collection I_g peut être mise à profit pour générer un courant de différence $I_{ref} - I_g$, qui peut être exploité.

Un dispositif selon l'invention, quel que soit le mode de réalisation envisagé, permet de

compenser des non-uniformités spatiales technologiques ou les non-uniformités des sources d'électrons connues.

D'autres formes d'arrangement, variantes et modes de réalisation pourront être mis en œuvre par
5 l'homme de métier, sans sortir du cadre de la présente invention.

REVENDICATIONS

1. Dispositif d'émission électronique (50) à plusieurs faisceaux d'électrons (59) comprenant une première structure (6) comportant une pluralité de sources (61) d'émission de faisceau d'électrons (69),
5 hybridée (9) avec une deuxième structure (7) comportant une pluralité d'ouvertures (8) de diaphragme.

2. Dispositif selon la revendication
10 précédente, dans lequel la deuxième structure (7) est formée par une électrode ou une membrane (70), métallique ou conductrice ou semi-conductrice.

3. Dispositif selon la revendication 1 ou
15 2, dans lequel l'hybridation (9-9') entre la première et la deuxième structure (6-7) est réalisée par l'entremise de billes métalliques (90), notamment de billes composées d'alliage de métaux fusibles et/ou de billes composées d'or.

20

4. Dispositif selon la revendication 1 ou
2, dans lequel l'hybridation (9-9') entre la première et la deuxième structure (6-7) est réalisée par l'entremise d'un ou de plusieurs films à conduction
25 anisotrope.

5. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 4, dans lequel au moins une ouverture (80) de diaphragme présente deux surfaces
30 d'ouvertures opposées (81/82) différentes, la surface d'ouverture (81) d'un côté du diaphragme (70) ayant une

aire supérieure à l'aire de l'autre surface d'ouverture (82) de l'autre côté du diaphragme (70).

6. Dispositif selon l'une des
5 revendications 1 à 5, dans lequel chaque ouverture (80) de diaphragme (70) comporte un profil de bord d'ouverture (83) en biseau, plat, concave ou convexe.

7. Dispositif selon l'une des
10 revendications 1 à 6, dans lequel chaque structure (6,7) comporte un agencement périodique des sources (61,62) d'émission d'électrons ou des ouvertures de diaphragme (8,80), les structures (6,7) ayant notamment un agencement matriciel ou un agencement multi-linéaire
15 ou un agencement linéaire, régulier ou irrégulier.

8. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 7, dans lequel les sources (61,62) d'émission de faisceau d'électrons (69) et les
20 ouvertures (8,80) de diaphragme (70) sont agencés avec un écartement de l'ordre de quelques microns à un millimètre.

9. Dispositif selon l'une des
25 revendications 1 à 8, comprenant en outre des moyens ou un système (4) de focalisation électrostatique ou magnétique ou électromagnétique des faisceaux d'électrons.

30 10. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 9, comprenant en outre des moyens ou

un système (40) de focalisation par projection magnétique.

11. Dispositif selon l'une des
5 revendications 1 à 10, comprenant en outre des troisièmes moyens, ou une troisième structure (40), d'anode ou d'électrode polarisée disposée au-delà de la deuxième structure (7) d'ouvertures de diaphragme (70).

10 12. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 11, dans lequel la deuxième structure (7) comporte au moins une partie conductrice (70,75) et au moins une partie diélectrique (71,72,76,77).

15 13. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 12, dans lequel la deuxième structure (7) comporte deux niveaux (70,75) d'électrodes ou de membranes, métalliques,
20 conductrices, accolées à au moins une couche diélectrique ((71,72).

14. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 13, dans lequel la deuxième
25 structure (7) présente, autour des zones (73,78) d'ouvertures (8) de diaphragme (70), une épaisseur de l'ordre d'une fraction de micromètre à quelques centaines de micromètres.

30 15. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 14, dans lequel la deuxième

structure (7) présente, en dehors des zones (73,78) d'ouvertures (8) de diaphragme, une épaisseur (71,72,76,77) de l'ordre d'un micromètre à environ un millimètre.

5

16. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 15, dans lequel la deuxième structure (7) a une structure alvéolaire isolant chaque ouverture (8) ou plusieurs groupes d'ouvertures entre eux, de sorte que chaque ouverture ou chaque groupe d'ouvertures est soumis à un potentiel respectif de polarisation.

17. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 16, dans lequel au moins un côté (82,82',83) du diaphragme (70) de la deuxième structure est plongé dans un champ électrique (E2) d'accélération ou de focalisation des électrons.

18. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 17, dans lequel la deuxième structure (7) d'ouverture de diaphragme (70) comporte deux côtés opposés (81/82), un côté (81) faisant face à un champ électrique (E1), l'autre côté (82) faisant face à un autre champ électrique (E2).

19. Dispositif selon la revendication 5 ou 6 prise en combinaison avec la revendication 17 ou 18, dans lequel les ouvertures (80,80') de diaphragme (70) sont orientées de sorte que la surface d'ouverture d'aire supérieure (82,81') fait face au champ

électrique de valeur supérieure (E_2, E_1'), la surface d'ouverture d'aire inférieure ($81, 82'$) faisant face au champ électrique de valeur inférieure (E_1, E_2') ou à l'absence de champ électrique.

5

20. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 19, dans lequel la deuxième structure (70) est soumise à au moins un potentiel de polarisation (V_d, V_{d1}, V_{d2}).

10

21. Dispositif selon l'une des revendications précédentes dans lequel la première structure comporte un substrat (160), une cathode (120), des moyens (124) émetteurs d'électrons, une grille (126) d'extraction, et dans lequel la deuxième structure forme des moyens (140) de collection de courant, isolés de la grille d'extraction et disposés de manière à collecter une partie du courant émis par les moyens émetteurs, des moyens (142) de mesure du courant collecté, et des moyens pour contrôler, en fonction d'une mesure du courant collecté, le courant émis par les moyens émetteurs d'électrons.

22. Dispositif selon la revendication 21, les moyens (124) émetteurs d'électrons comportant au moins une micro-pointe ou un nanotube.

23. Dispositif selon la revendication 21 ou 22, dans lequel les moyens de contrôle du courant émis par les moyens émetteurs d'électrons comprennent des

30

moyens (134) de polarisation en impulsions de la grille (126) d'extraction.

24. Dispositif selon la revendication 21 ou
5 22, dans lequel les moyens de contrôle du courant émis par les moyens émetteurs d'électrons comprennent des moyens (134) de polarisation en impulsions de la cathode.

10 25. Dispositif selon l'une des revendications 21 à 24, dans lequel le substrat est un substrat CMOS (160).

26. Dispositif selon la revendication 25,
15 des traversées électriques permettant de connecter les moyens (140) de collection et la grille (126) d'extraction au substrat CMOS (160).

27. Dispositif selon l'une des
20 revendications 21 à 25 en combinaison avec la revendication 3, dans lequel les moyens (140) de collection étant reliés par des moyens d'interconnexion électrique et mécanique formés par les billes ou un pilier à une zone conductrice (171).

25

28 Dispositif selon la revendication 27, les moyens (142) de mesure de courant étant situés dans le substrat.

30 29. Dispositif selon l'une des revendications 21 à 27, les moyens (142) de mesure de

courant étant réalisés sur un substrat sur lequel se situent les moyens de collection.

30. Dispositif selon l'une des
5 revendications 21 à 29, les moyens (142) de mesure de courant comportant un amplificateur (180) sur lequel un condensateur (182) ou une résistance (184) est monté en contre-réaction.

10 31. Dispositif selon la revendication précédente, les moyens (142) de mesure de courant comportant un montage de mesure par miroir de courant.

15 32. Dispositif selon la revendication 31, les ouvertures étant circulaires ou comportant des secteurs circulaires (100, 102, 104).

1 / 12

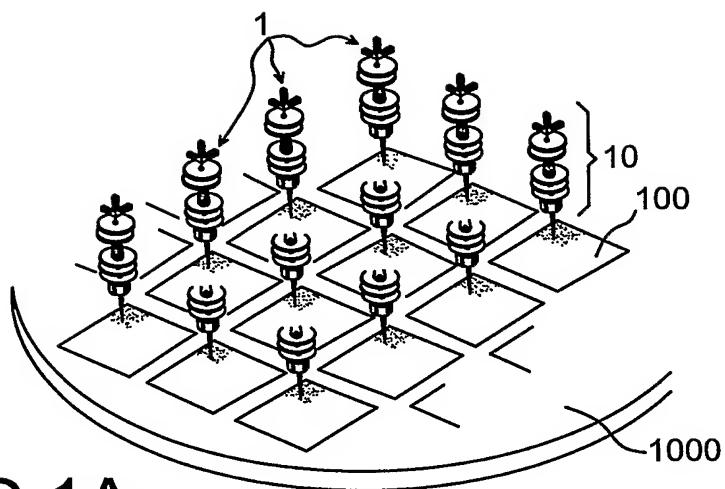


FIG 1A

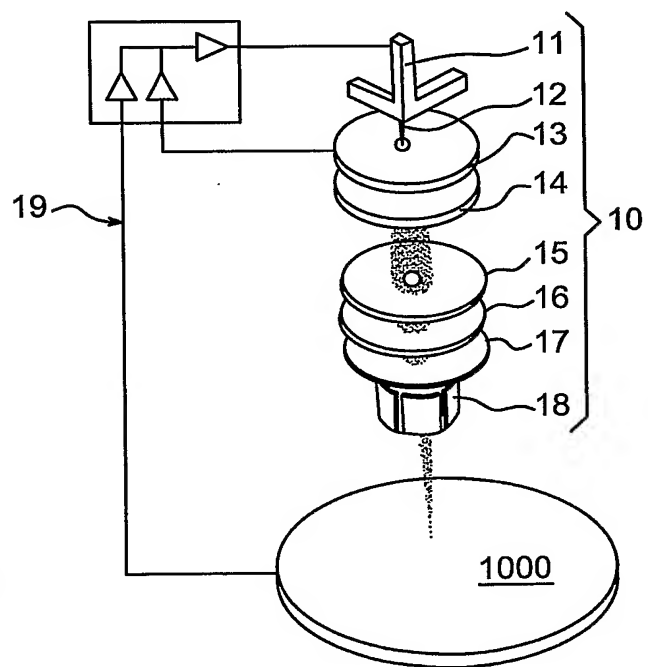


FIG 1B

2 / 12

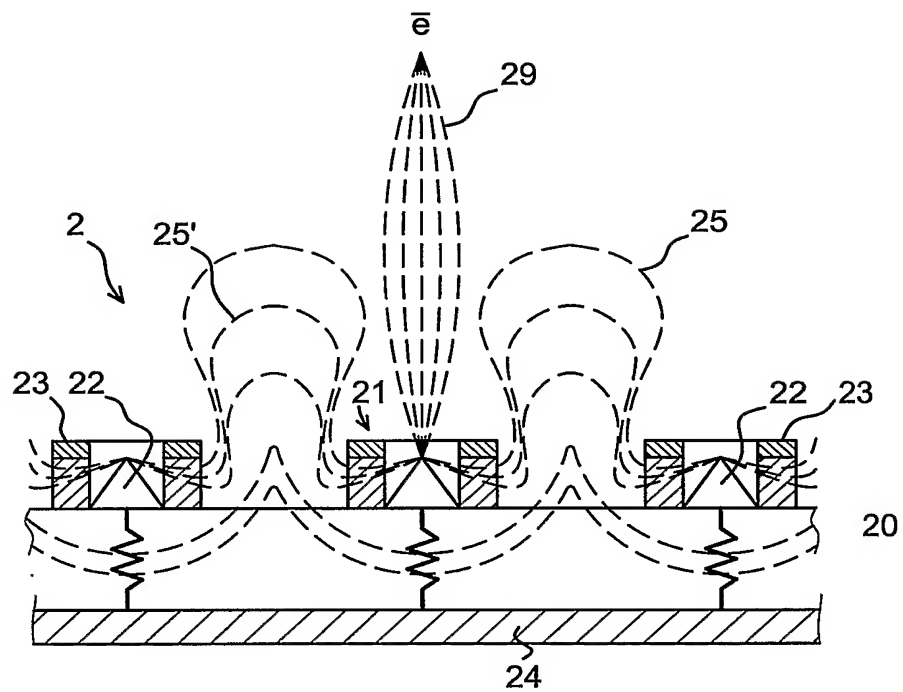


FIG 2

3 / 12

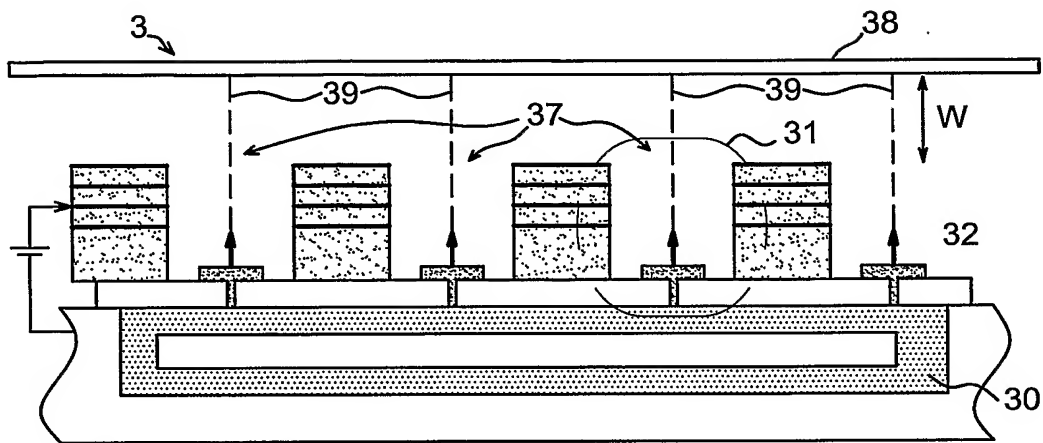


FIG 3A

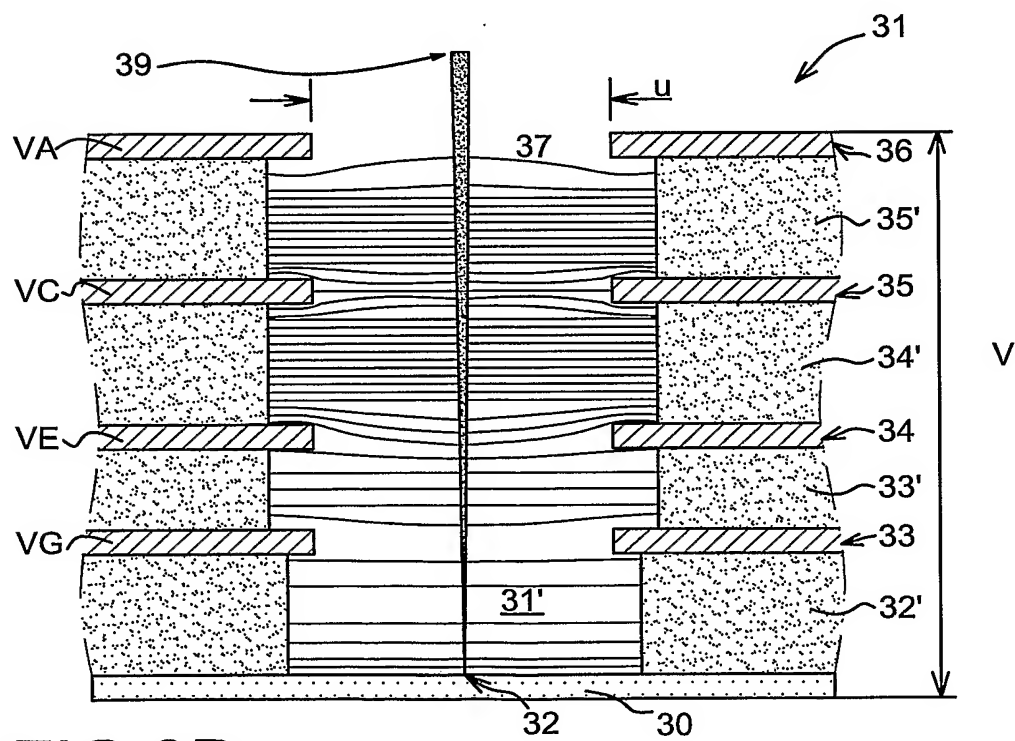


FIG 3B

4 / 12

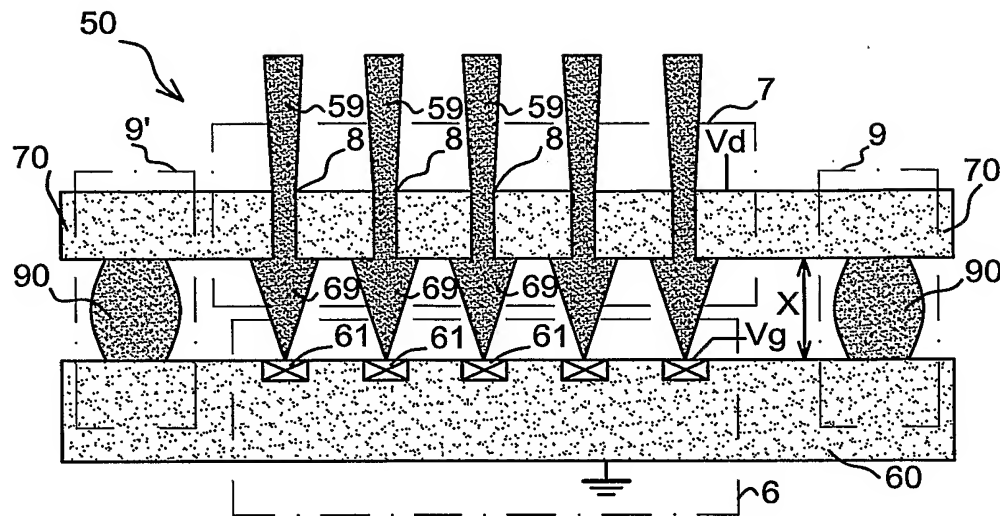


FIG 4

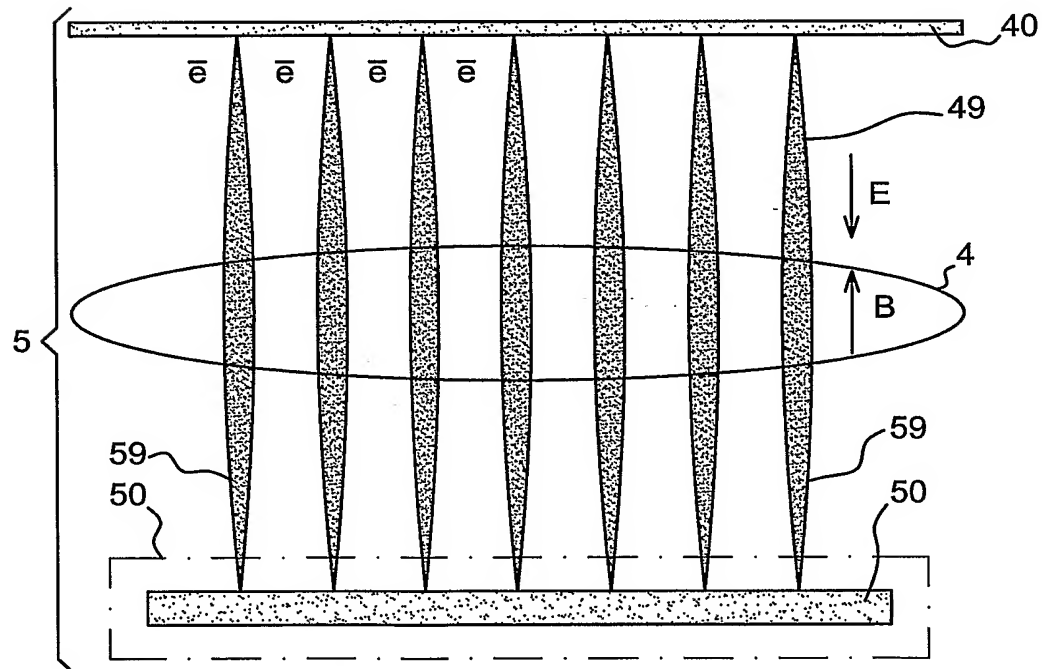


FIG 5

5 / 12

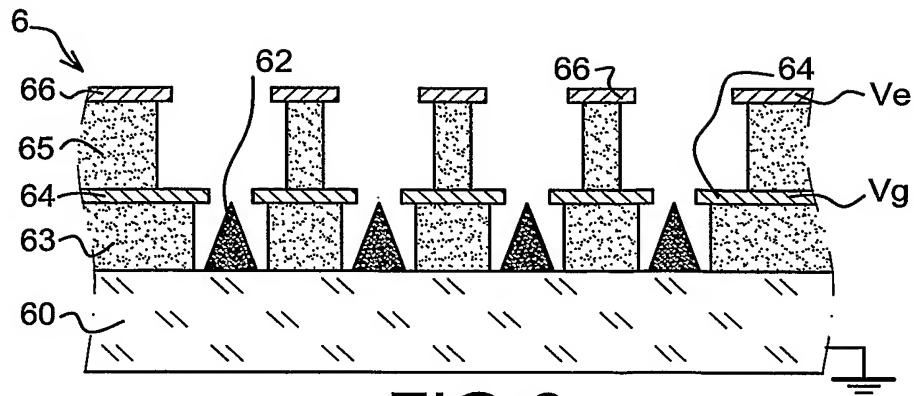


FIG 6

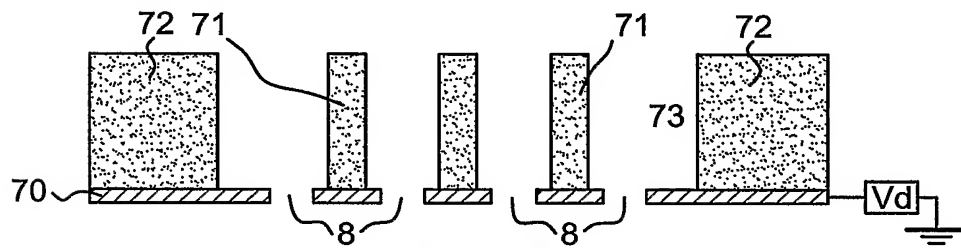


FIG 7A

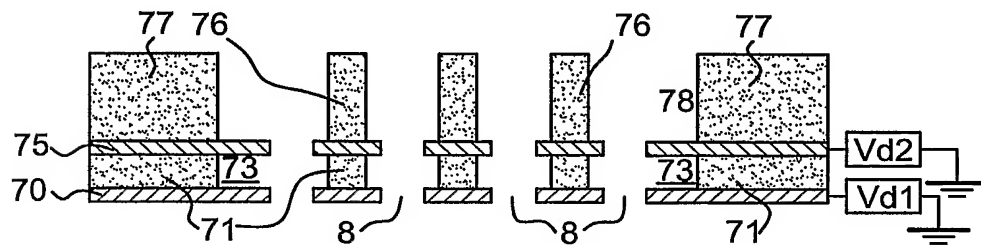


FIG 7B

6 / 12

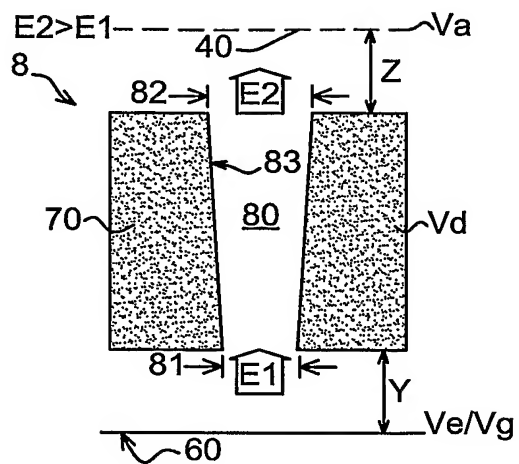


FIG 8A

FIG 8B

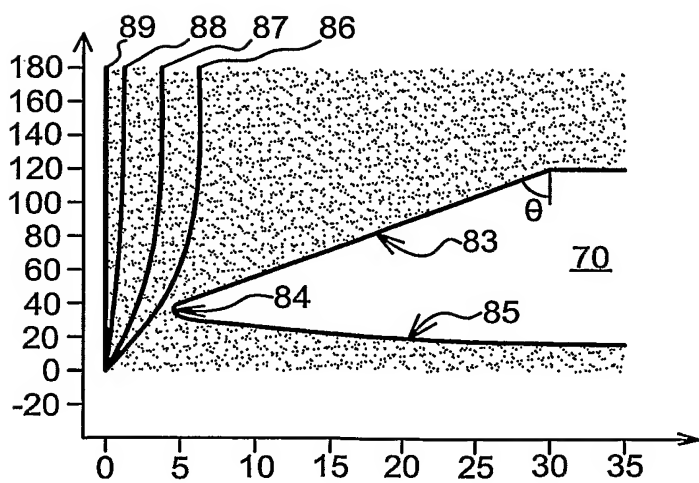
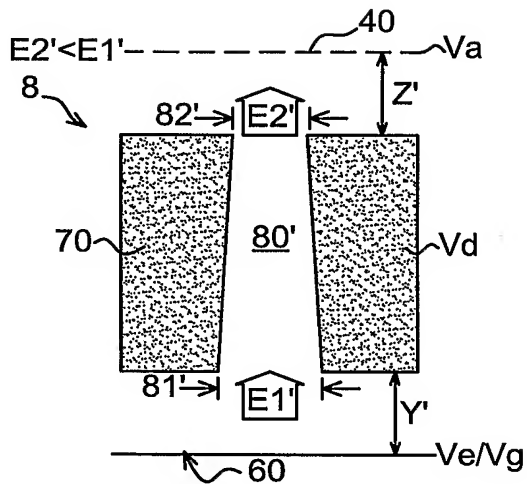


FIG 8C

7 / 12

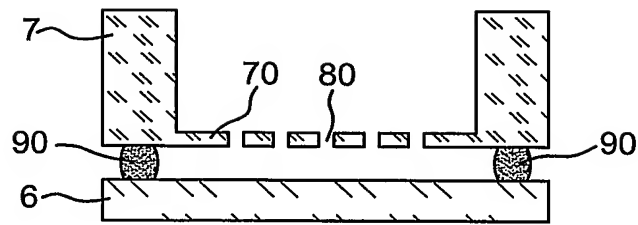


FIG 9

FIG 9'

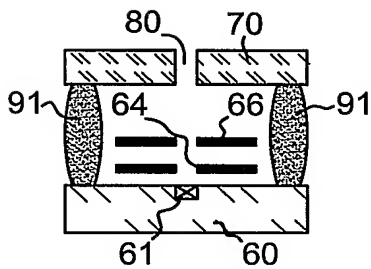
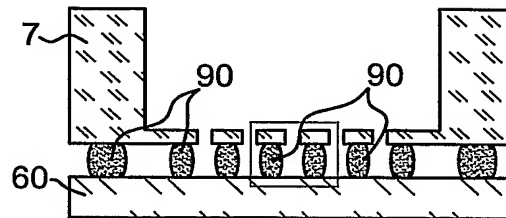


FIG 9'A

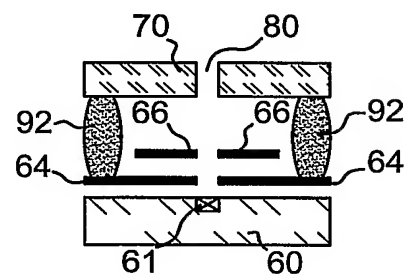


FIG 9'B

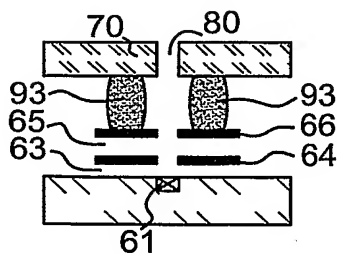


FIG 9'C

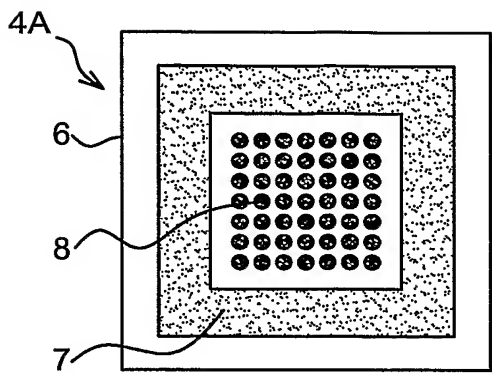


FIG 10

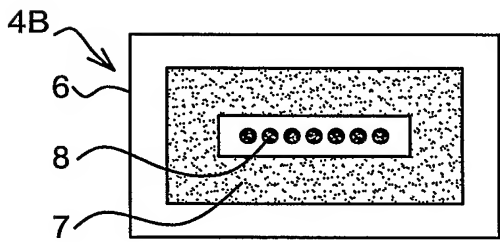


FIG 11

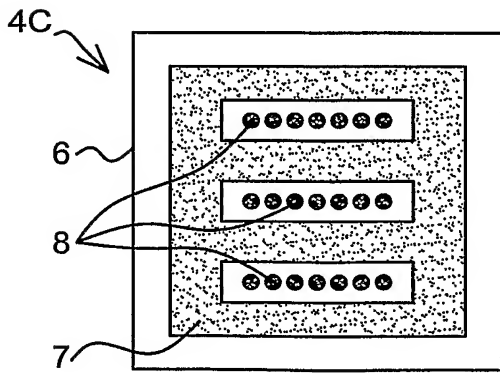


FIG 12

9 / 12

FIG. 13A

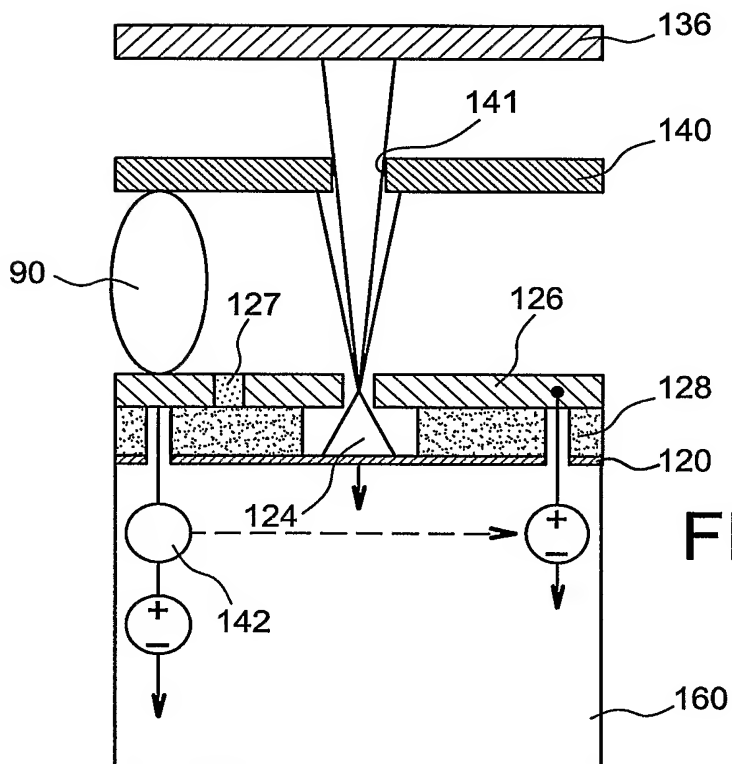
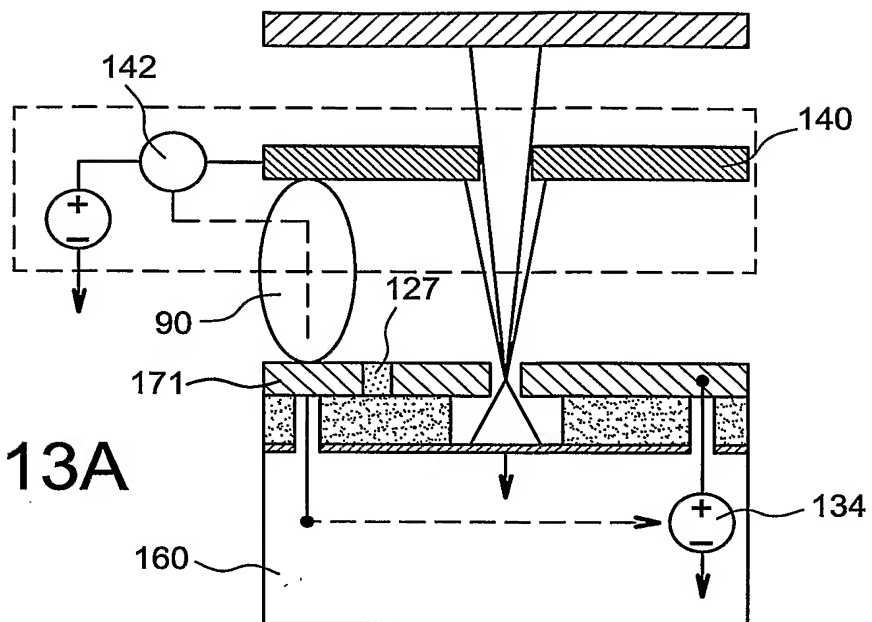
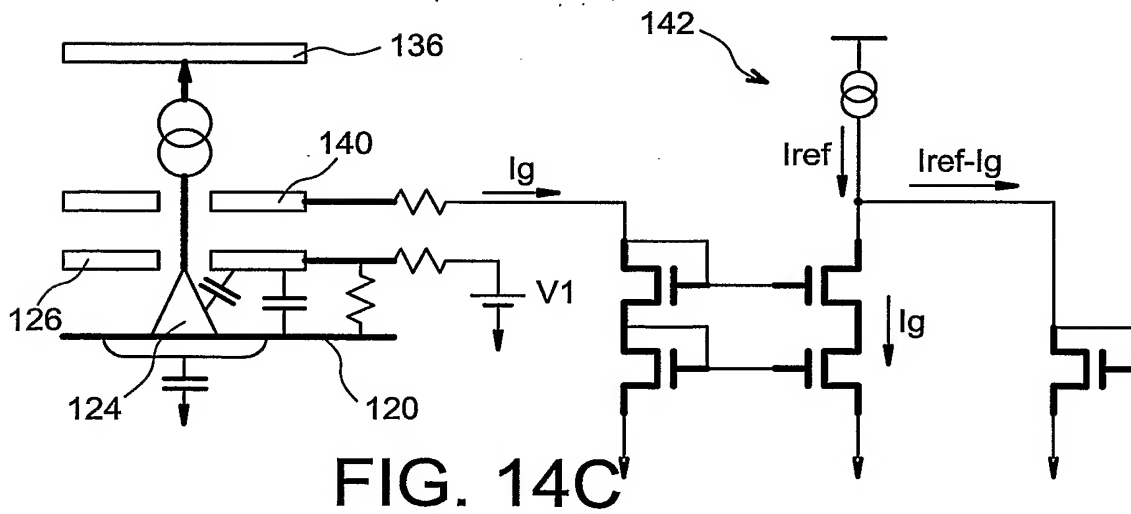
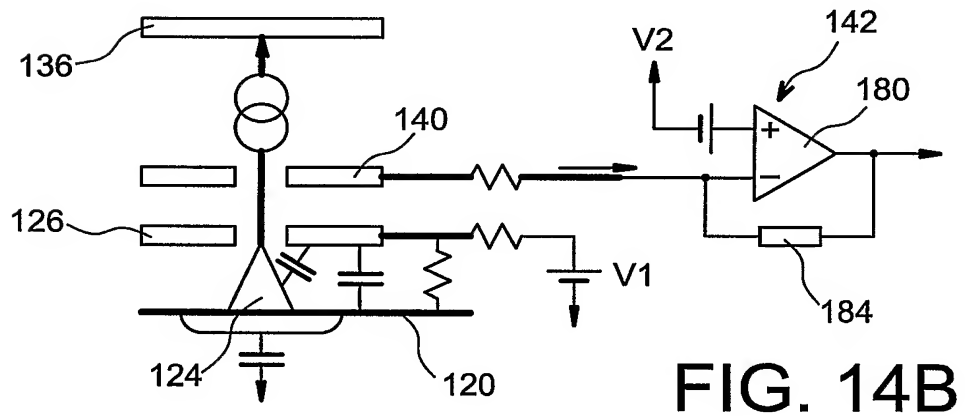
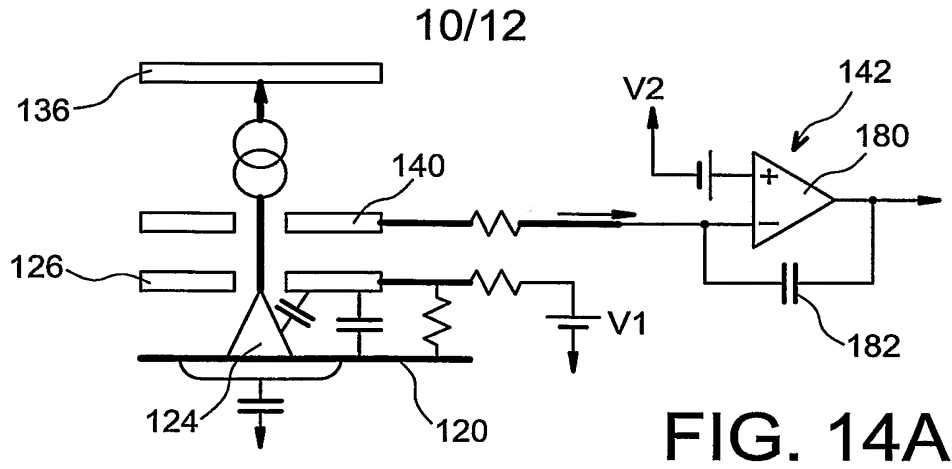


FIG. 13B



11/12

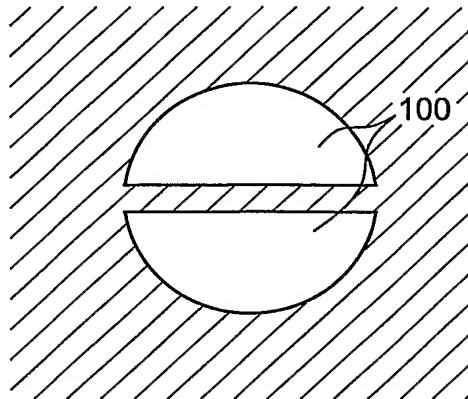


FIG. 15A

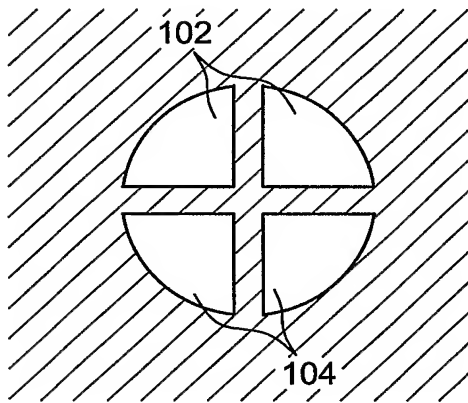


FIG. 15B

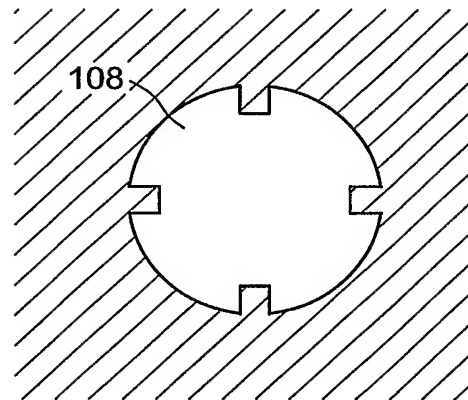


FIG. 15C

12/12

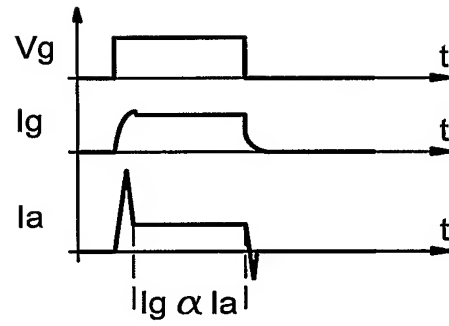


FIG. 16A

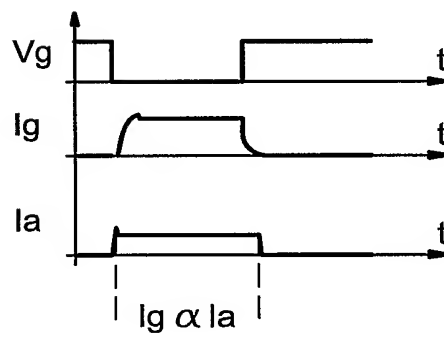


FIG. 16B